

APOSTILA DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Elaborado por:
Professor Luiz Sérgio B Marques
Ana Barbara K. Sambaqui
Janderson Duarte

Instituto Federal de Santa Catarina-Campus Joinville, Julho 2013

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	5
2	Máquinas de Corrente Contínua	6
2.1	INTRODUÇÃO.....	6
2.2	Princípio de funcionamento.....	6
2.3	Equações para a máquina de corrente contínua.....	9
2.4	Gerador de corrente contínua	10
2.4.1	Gerador com Excitação Independente	10
2.4.2	Gerador com Excitação de Campo Paralelo	11
2.4.3	Gerador com excitação de campo série.....	11
2.4.4	Gerador com excitação de campo composta.....	12
2.5	Classificação dos motores de corrente contínua.....	12
2.5.1	Motor com Excitação Independente	13
2.5.2	Motor Derivação	13
2.5.3	Motor Série	14
2.5.4	Motor com Excitação Composta.....	15
2.5.5	Curvas Características dos Motores CC.....	15
2.6	Velocidade e inversão do sentido de rotação do motor.....	16
2.7	Variação da velocidade de um motor	17
2.8	Exercícios máquinas cc	18
3	Aulas práticas máquinas cc	20
3.1	Aula prática 1 : Geradores de corrente contínua	20
3.2	Aula prática 2 : Geradores de corrente contínua com carga.....	21
4	Máquina síncrona.....	22
4.1	Introdução.....	22
4.2	Máquina Síncrona.....	23
4.3	Exercícios máquinas síncronas.....	34
5	aulas práticas máquinas síncronas	36
5.1	experimento 1	36
5.2	experimento 2.....	37
6	motor de indução trifásico.....	38
6.1	Introdução.....	38
6.2	Exercícios mit.....	54
7	Motor de indução monofásico.....	56
7.1	Introdução.....	56
8	Servomotor.....	61
8.1	Introdução.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes principais da máquina de corrente contínua.	6
Figura 2 - Enrolamentos de armadura e de campo.....	7
Figura 3 – Primeiro e Segundo Estágios de Funcionamento do Motor CC.....	7
Figura 4 - Terceiro e Quarto Estágio de Funcionamento do Motor CC.	7
Figura 5 – Atração e repulsão entre campos magnéticos.....	8
Figura 6– Processo de retificação mecânica.	8
Figura 7– Formas de onda para a tensão induzida e retificada.	9
Figura 8 – A força contra eletromotriz ou tensão gerada é induzida no enrolamento de armadura. ...	9
Figura 9 - Gerador cc com excitação independente.	11
Figura 10 - Gerador cc com excitação de campo paralelo.....	11
Figura 11 - Gerador de cc com excitação de campo série.	12
Figura 12 - Gerador de cc com excitação composta.	12
Figura 13 – Motor com Excitação Independente.....	13
Figura 14– Motor derivação.....	13
Figura 15 – Curva velocidade de rotação em função do torque desenvolvido.	14
Figura 16 – Circuito equivalente para o motor série.....	15
Figura 17 – Motor de Excitação Composta.	15
Figura 18 – Curvas de velocidade em função do torque para motores de corrente contínua.	16
Figura 19 – Curvas de Tensão em Função da Corrente para Geradores de Corrente Contínua.	16
Figura 20 – Controle da velocidade do motor de corrente contínua.....	17
Figura 21 - Consumo de energia elétrica no Brasil.....	22
Figura 22 - Consumidores mais importantes do setor industrial	22
Figura 23 – Rotor de uma máquina síncrona com pólos do tipo saliente.	23
Figura 24 – Dois geradores - derivação em paralelo.	24
Figura 25 – Excitatriz rotativa	25
Figura 26– Excitatriz Estática.	25
Figura 27– Excitatriz sem escovas.....	26
Figura 28 – Circuitos que compõe a excitatriz sem escovas.....	26
Figura 29– Método de partida do motor síncrono através de inversor de frequência.....	27
Figura 30– Partida do motor síncrono como motor de indução monofásico.	27
Figura 31 - Curvas V para um motor síncrono.	27
Figura 32 – Triângulo de potências.....	29
Figura 33 – Triângulo de potências para cálculo da correção do fator de potência.....	30
Figura 34 – Influência da instalação de capacitores na potência reativa da rede.....	31
Figura 35 – Circuito equivalente para a máquina síncrona.....	31
Figura 36– Gráfico da potência e do torque em função do ângulo de torque.	32
Figura 37– Método com variação da frequência para controle da velocidade.....	32
Figura 38 – Curva de torque em função da velocidade.....	33
Figura 39 – (a) Vista em corte da máquina assíncrona. (b) Enrolamento do estator conectado em Y. (c) Enrolamento do estator conectado em delta.	38
Figura 40 – Correntes instantâneas em cada enrolamento.....	39
Figura 41 – Campo magnético girante.....	39
Figura 42– Ilustração para o princípio de funcionamento da máquina assíncrona.	40
Figura 43 – Distribuição de densidade de fluxo ao longo do entreferro.....	40
Figura 44 – Circuito elétrico equivalente para a máquina de indução.....	42
Figura 45– Curvas conjugados x velocidade para as categorias N, H e D.....	42
Figura 46– Solicitação de torque durante a partida e em regime permanente.	43
Figura 47– Controle de velocidade através da variação da frequência.....	44
Figura 48– Método de partida utilizando autotransformador.	44
Figura 49– Método de partida utilizando a conexão estrela-triângulo.....	45
Figura 50– Método de partida utilizando um conversor estático.....	45

Figura 51– Partida de motor de indução com fase dividida.....	46
Figura 52– Eficiência nominal para motores padrão e de alto rendimento.	50
Figura 53 – Diagrama para o motor de indução monofásico.....	56
Figura 54– Curva de torque em função da velocidade do rotor.....	56
Figura 55– Campo magnético pulsante devido ao duplo campo magnético girante.	57
Figura 56– (a) Diagrama para o método de partida com enrolamento auxiliar. (b) Diagrama de Fasores.	58
Figura 57– (a) Diagrama para o método de partida com capacitor de partida. (b) Diagrama de Fasores.	59
Figura 58– (a) Diagrama para o método de partida com enrolamento auxiliar e capacitor permanentes. (b) Gráfico torque percentual em função do percentual da velocidade síncrona.....	59
Figura 59- (a) Diagrama para o método de partida com capacitor de partida e capacitor permanente. (b) Gráfico torque percentual em função do percentual da velocidade síncrona.....	59
Figura 60– Motor de indução monofásico com capacitor permanente.....	60
Figura 61– Conjunto servomotor e servoconversor.....	61
Figura 62– Servomotor com excitação independente e respectiva curva de conjugado versus velocidade.	62

1 INTRODUÇÃO

Esta apostila foi elaborada para auxiliar nos estudos dos alunos nos cursos técnicos de eletroeletrônica e no curso tecnólogo em mecatrônica ofertadas no campus Joinville na disciplina de Máquinas Elétrica e Conversão de Energia. Esta apostila deve ser tratada como material auxiliar e as diversas outras literaturas sobre o assunto também devem ser utilizadas.

Nesta apostila são tratados alguns pontos considerados importantes sobre alguns dos principais motores, expostos em forma de texto, ilustrações e também exercícios propostos.

A apostila está dividida da seguinte forma: primeiro é apresentado a Máquina de Corrente Contínua, em seguida é apresentada a Máquina Síncrona, em seguida é apresentado o motor de Indução trifásico, em seguida é apresentado o motor de Indução Monofásico, em seguida é apresentada o Motor de Passo, em seguida é apresentado o servo-motor e finalmente o motor universal.

2 MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

2.1 INTRODUÇÃO

A máquina de corrente contínua foi, durante muito tempo, a solução mais natural para problemas em que era imprescindível variar a velocidade durante o funcionamento, devido a simplicidade para variar a velocidade com este tipo de máquina, que pode ser obtida variando a tensão de alimentação contínua ou variando a intensidade do campo magnético. Isto resultou em sua ampla utilização no passado. Além disso, em situações em que só se dispunha de fontes de alimentação contínua, era mais viável utilizar uma máquina de corrente contínua do que converter a tensão contínua para alternada, utilizando então máquinas que funcionam alimentadas por uma corrente alternada.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A máquina de corrente contínua possui duas partes principais: o estator e o rotor. O estator e o rotor encontram-se separados pelo entreferro. O estator é a parte da máquina que é estacionária. Isto é, não possui movimento. O rotor é a parte móvel, ou rotacionária. Ambos, estator e rotor, são construídos utilizando materiais ferromagnéticos. Este é necessário para aumentar a densidade de fluxo e diminuir assim o tamanho da máquina. A Figura 1 mostra as partes principais para a máquina de corrente contínua.

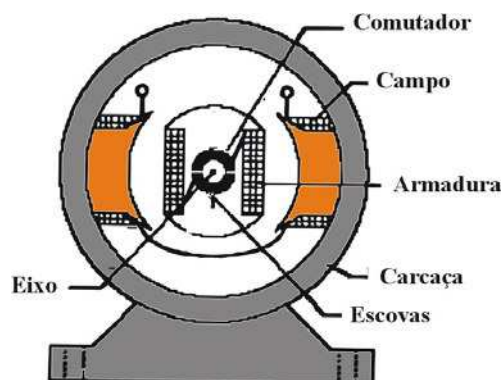


Figura 1 – Partes principais da máquina de corrente contínua.

Os condutores inseridos nos canais do estator ou do rotor são interconectados para formar os enrolamentos. O enrolamento no qual a tensão é induzida é dito enrolamento de armadura. O enrolamento no qual uma corrente elétrica circula com a função de produzir uma fonte primária de fluxo é dito enrolamento de campo. Na máquina de corrente contínua o enrolamento de campo encontra-se no estator e o enrolamento de armadura no rotor, como pode ser visto na Figura 2.

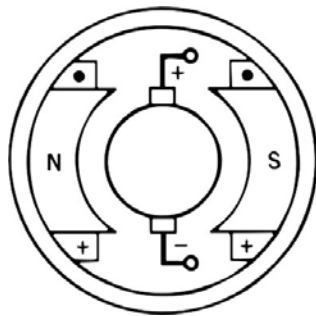


Figura 2 - Enrolamentos de armadura e de campo.

O princípio de funcionamento elementar de um motor de corrente contínua está baseado na força eletromagnética que atua sobre cada condutor imerso em um campo magnético, quando sobre ele circula uma corrente elétrica. Como a força útil que atua em cada condutor está a uma distância R (raio) do centro do rotor, o somatório da contribuição de todos os conjugados dá origem ao conjugado do motor. A Figura 3 apresenta o primeiro e Segundo estágios do funcionamento do motor CC.

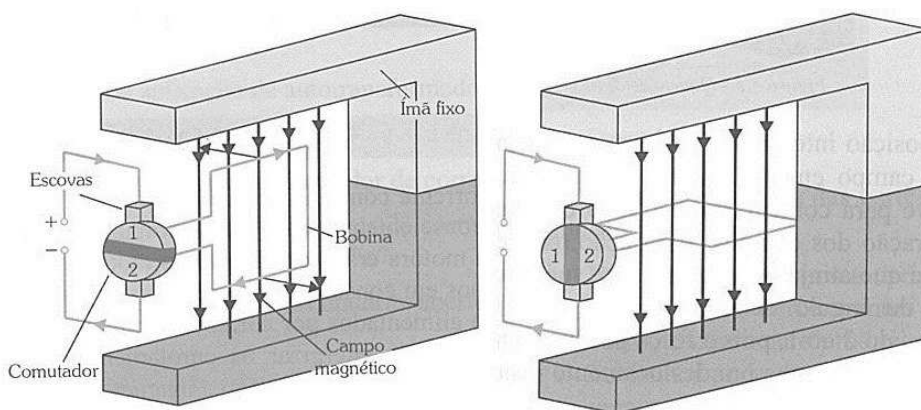


Figura 3 – Primeiro e Segundo Estágios de Funcionamento do Motor CC.

Na Figura 3 o ímã representa o enrolamento de campo onde a parte de baixa está o polo sul e a parte de cima o polo norte do ímã. O enrolamento de armadura é então conectado a uma fonte CC através das escovas e do comutador. Começa a circular corrente pelo enrolamento de armadura no sentido indicado na Figura 3, devido a essa corrente um campo magnético é gerado em torno da condutor da armadura, cujo sentido é dado pela regra da mão direita, este campo interage com o campo do ímã e então uma força surge com sentido indicado na Figura 3 e faz com que o enrolamento de armadura gire.

A Figura 4 apresenta o terceiro e quarto estágio do funcionamento do motor CC.

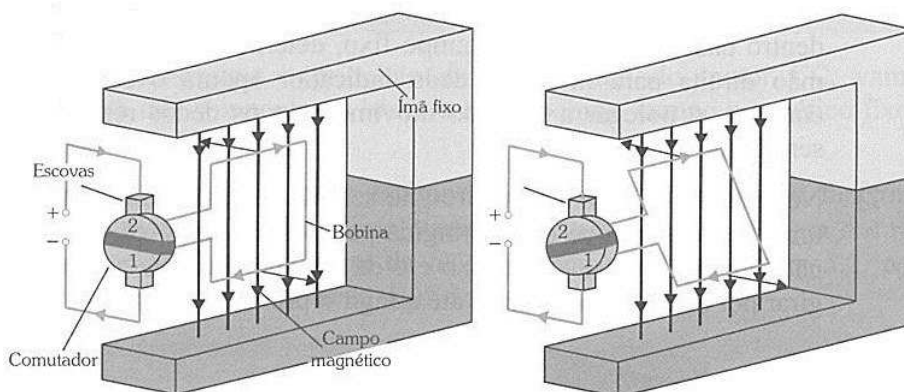


Figura 4 - Terceiro e Quarto Estágio de Funcionamento do Motor CC.

Como pode ser observado na Figura 4 entre o segundo e o terceiro estágio a corrente continua no mesmo sentido do enrolamento de armadura e também na fonte de alimentação, fazendo assim com que a força sobre o enrolamento de armadura possua sempre o mesmo sentido. O comutador faz com o sentido seja o mesmo, ou seja, ele faz a retificação mecânica, caso o contrário a corrente na fonte de alimentação seria alternada e consequentemente a força resultante sobre o enrolamento de armadura seria nula.

O princípio de funcionamento do motor de corrente contínua também pode ser entendido através do princípio de atração e repulsão entre campos magnéticos, devido à interação do campo magnético criado pelas bobinas de campo com o campo magnético criado pelas bobinas de armadura, conforme ilustrado na Figura 5.

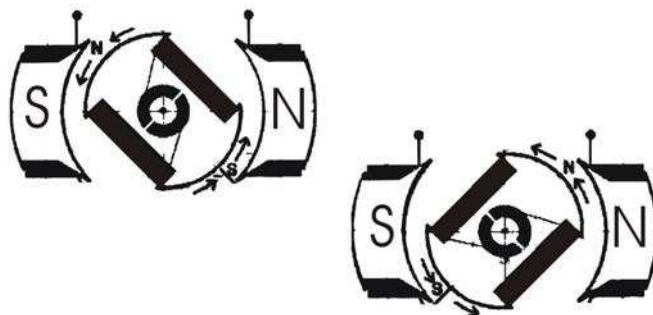


Figura 5 – Atração e repulsão entre campos magnéticos.

A Figura 6 permite visualizar que a retificação mecânica é realizada pelo conjunto comutador (fabricado em cobre) e escova (fabricado em carvão e grafito). A escova 1, posicionada próxima ao pólo norte magnético, sempre estará em contato com o segmento positivo do comutador. A escova 2, posicionada próxima ao pólo sul magnético, sempre estará em contato com o segmento negativo do comutador.

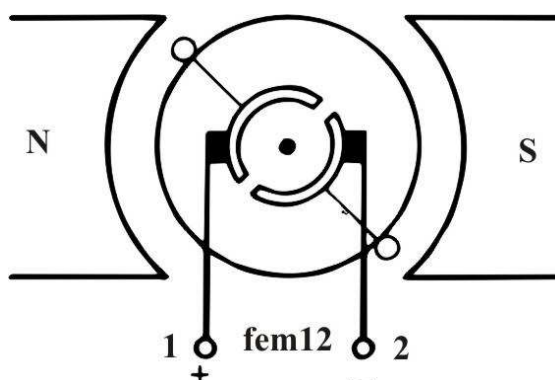


Figura 6– Processo de retificação mecânica.

A Figura 7 mostra a forma de onda para a tensão induzida, alternada, e a forma de onda para a tensão após a retificação, contínua.

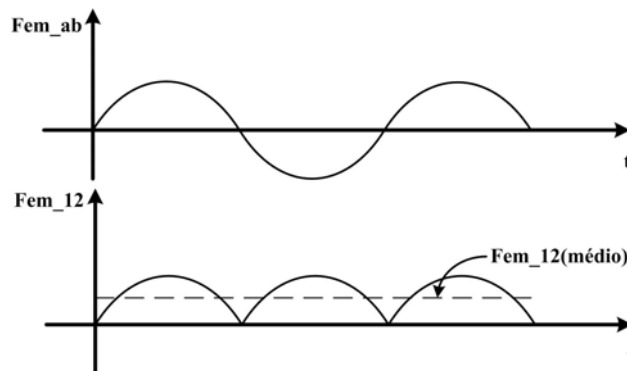


Figura 7– Formas de onda para a tensão induzida e retificada.

2.3 EQUAÇÕES PARA A MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

Enquanto o enrolamento de armadura gira imerso no campo magnético produzido pelo enrolamento de campo, localizada no estator, uma tensão alternada é induzida no enrolamento de armadura. A equação (1) permite calcular a tensão gerada ou FCEM. A Figura 8 ilustra o fato de que a tensão gerada ou FCEM E_a é induzida no enrolamento de armadura. A equação (2) representa a velocidade angular da máquina.

$$E_a = K_a \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (1)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (2)$$

Onde:

K_a – constante da máquina (Adimensional);

Φ – fluxo por pólo em Wb (Weber);

ω_m – velocidade angular em (Rad/s);

E_a – Tensão gerada ou força contra eletromotriz (FCEM) em Volts;

n – Rotação do eixo em rpm (Rotações por Minuto).



Figura 8 – A força contra eletromotriz ou tensão gerada é induzida no enrolamento de armadura.

Esta expressão para a tensão induzida no enrolamento de armadura é válida tanto para a máquina funcionando como motor como para a máquina funcionando como gerador. Funcionando como motor ela é conhecida como Força Contra Eletromotriz e funcionando como gerador ela é conhecida por Tensão Gerada ou Tensão Induzida.

O torque desenvolvido quando o enrolamento de armadura conduz uma corrente elétrica e encontra-se imerso em um campo magnético produzido pelo enrolamento de campo, é determinado através da equação (3).

$$T = K_a \cdot \phi \cdot I_a \quad (3)$$

Onde:

T – Torque ou conjugado em (Nm – Newton.Metro);

I_a – Corrente de armadura em Amperes.

No caso de um motor de corrente contínua ideal, a potência elétrica de entrada deve ser igual à potência mecânica de saída, como mostra a equação (4). O inverso é verdadeiro para a máquina funcionando como gerador.

$$E_a \cdot I_a = T \cdot \omega_m \quad (4)$$

Exemplo: Considere uma máquina de corrente contínua de quatro pólos, funcionando a 150 rotações por minuto, com constante de máquina igual a 73,53 e fluxo por pólo igual a 27,6mWb. Determine a tensão gerada e o torque desenvolvido pelo motor quando a corrente de armadura for igual a 400A. Qual a potência de entrada para esta máquina?

R: $E_a=31,88V$; $T=811,77Nm$; $P_{in}=12,752kW$

2.4 GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA

A geração de corrente contínua é obtida quando uma máquina primária é conectada ao eixo de uma máquina de corrente contínua, aplicando a este eixo um conjugado mecânico e imprimindo uma determinada velocidade à máquina. Os geradores de corrente contínua são classificados da seguinte forma:

Gerador com excitação de campo independente.

Gerador com excitação de campo paralelo.

Gerador com excitação de campo série.

Gerador com excitação de campo composta.

Em todas as configurações, nas diversas aplicações, é essencial conhecer o comportamento da tensão nos terminais do gerador com a variação da corrente de carga, conhecida como característica externa do gerador. Entretanto, devido ao fato deste aprofundamento não fazer parte do objetivo principal para o presente texto, serão abordadas apenas as características básicas para cada configuração.

2.4.1 Gerador com Excitação Independente

Nesta configuração o enrolamento de campo deve ser alimentado por uma fonte de corrente contínua independente. Esta fonte de alimentação pode ser outro gerador de corrente contínua, uma fonte retificada ou até mesmo uma bateria. A Figura 9 ilustra esta configuração para o gerador de corrente contínua.

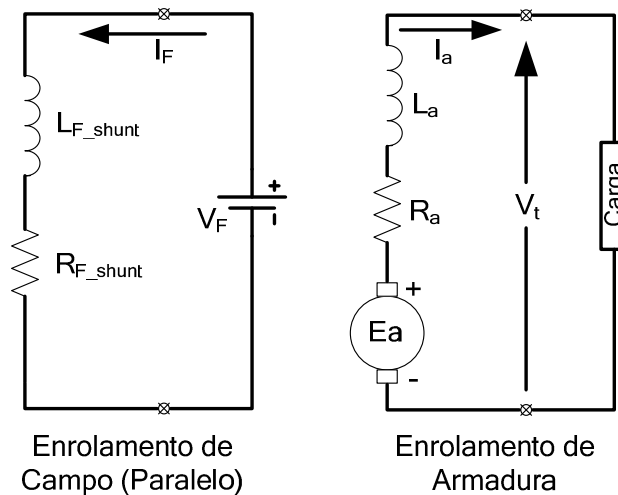


Figura 9 - Gerador cc com excitação independente.

2.4.2 Gerador com Excitação de Campo Paralelo

Nesta configuração o enrolamento de campo é conectado em paralelo com o enrolamento de armadura. O enrolamento de armadura fornece a alimentação necessária ao enrolamento de campo. Surge então a pergunta: como é possível o enrolamento de armadura fornecer uma tensão para alimentar o enrolamento de campo, se o primeiro necessita do segundo como fonte de força magneto motriz? A resposta reside na capacidade do material ferromagnético de reter uma determinada densidade de fluxo residual. Este magnetismo residual é o responsável por gerar uma pequena tensão nos terminais de saída do gerador, tensão esta que irá realimentar o enrolamento de campo, aumentando desta maneira o fluxo por pólo necessário para que o gerador atinja a tensão de saída nominal em seus terminais de saída. Este processo é conhecido como **Escorvamento** do gerador de corrente contínua. A Figura 10 apresenta o circuito para o gerador de corrente contínua com excitação de campo paralelo.

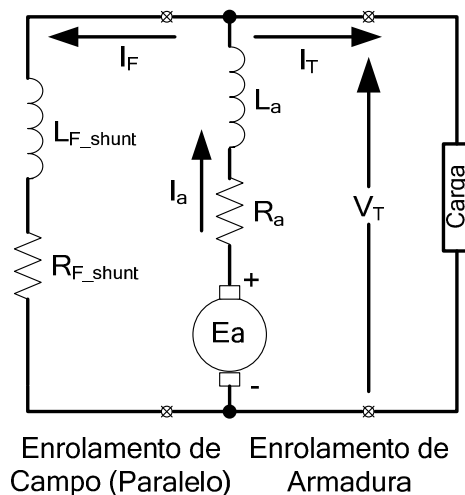


Figura 10 - Gerador cc com excitação de campo paralelo.

2.4.3 Gerador com excitação de campo série

O gerador com excitação de campo série possui a peculiaridade de que é necessária uma carga conectada entre seus terminais de saída para que exista uma corrente no enrolamento de campo. Como a corrente de armadura é a responsável pela excitação do enrolamento de campo, é

fundamental para o funcionamento deste gerador que os terminais de saída estejam conectados à carga. A excitação inicial também é devido ao magnetismo residual. A Figura 11 ilustra o circuito elétrico para o gerador série.

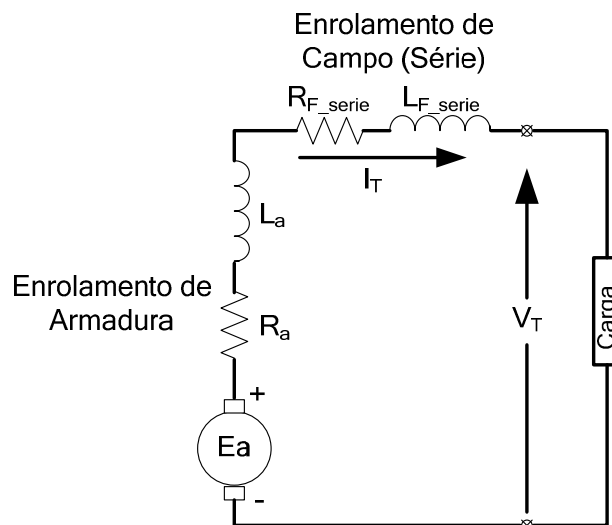


Figura 11 - Gerador de cc com excitação de campo série.

2.4.4 Gerador com excitação de campo composta

A conexão do enrolamento de campo da forma como é apresentada na Figura 12 possibilita contornar os problemas devido à queda de tensão na resistência de armadura. A bobina adicional, conectada em série, pode fornecer força magneto motriz adicional para aumentar ou diminuir o fluxo por pólo, de acordo com a necessidade.

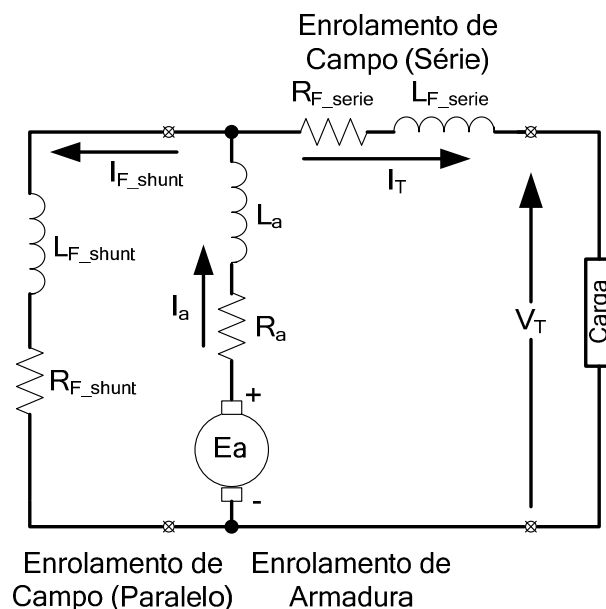


Figura 12 - Gerador de cc com excitação composta.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Os motores de corrente contínua são classificados de acordo com as ligações do enrolamento de campo, são eles:

Motor com excitação Independente

Motor derivação.

Motor série.

Motor de excitação composta.

2.5.1 Motor com Excitação Independente

No motor com excitação independente o enrolamento de campo é conectado a uma fonte de tensão independente e o enrolamento de armadura é conectado a outra fonte, não tendo nenhuma ligação entre os dois enrolamentos.

A Figura 13 apresenta o circuito esquemático do motor com excitação de campo independente.

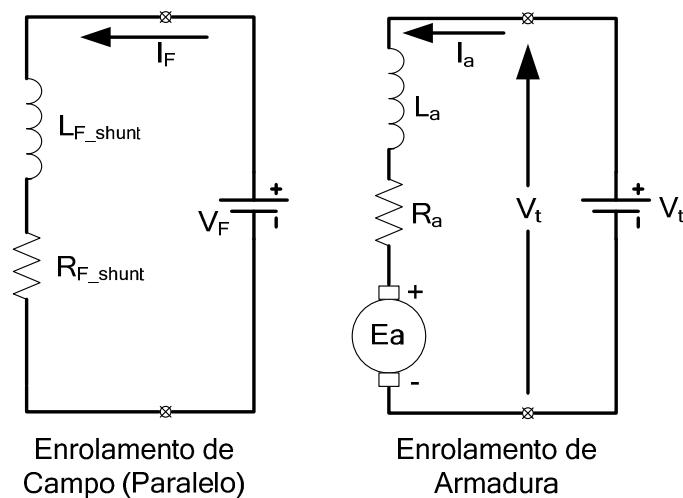


Figura 13 – Motor com Excitação Independente.

2.5.2 Motor Derivação

A Figura 14 mostra um circuito esquemático para o motor derivação. O enrolamento de armadura e o enrolamento de campo estão dispostos em paralelo e conectados a uma fonte de alimentação contínua. Um reostato externo pode ser utilizado para controlar a velocidade do motor através do controle do fluxo produzido pelo enrolamento de campo, ou pode-se variar a tensão de alimentação da fonte.

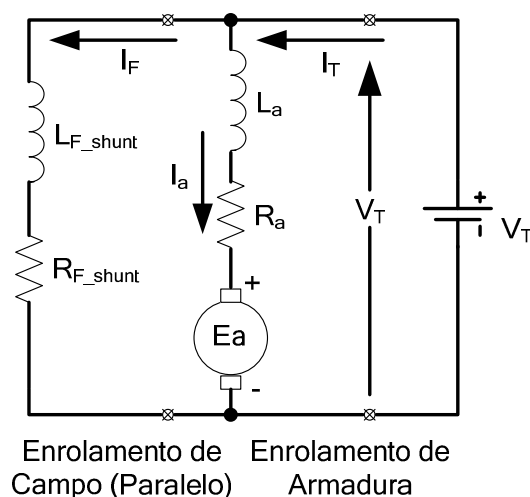


Figura 14– Motor derivação.

Os motores de corrente contínua são utilizados em muitas aplicações. Algumas aplicações requerem que a velocidade permaneça constante à medida que varia a carga aplicada ao eixo do motor. Em outras aplicações, é necessário variar a velocidade dentro de uma determinada faixa. O técnico responsável pela escolha do motor para uma determinada aplicação deve conhecer a curva da velocidade em função do torque. A Figura 15 apresenta esta curva para o motor derivação.

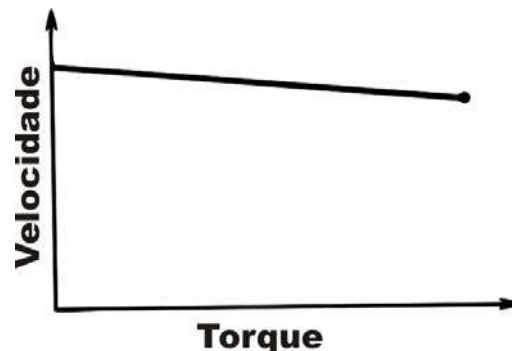


Figura 15 – Curva velocidade de rotação em função do torque desenvolvido.

2.5.3 Motor Série

A Figura 16 mostra o circuito equivalente do motor série. Um reostato externo em série com o enrolamento de armadura pode ser utilizado para controlar a velocidade do motor. As equações (5) e (6) são as principais equações para o motor série. A equação (6) permite concluir que o motor série não deve ser utilizado sem carga, pois nessas condições, a corrente de armadura I_a é muito pequena e a velocidade de rotação muito elevada, podendo atingir valores perigosos.

$$V = E_a + I_a \cdot (R_a + R_f) \quad (5)$$

$$\omega_m = \frac{V - I_a \cdot (R_a + R_f)}{K_{sr} \cdot I_a} \quad (6)$$

O motor série gira lentamente com cargas pesadas e muito rapidamente com cargas leves. Se a carga for retirada completamente, a velocidade aumentará perigosamente, podendo até despedaçar o motor, pois a corrente de armadura será muito pequena. A redução no valor da corrente drenada pelo motor implica em redução do fluxo devido ao enrolamento de campo série. A força contra eletromotriz responsável por limitar a corrente de armadura, de acordo com a equação (1), para manter-se constante, requer um aumento na velocidade da máquina para compensar o efeito na redução do fluxo por pólo. Dessa maneira, o motor poderá não girar com velocidade suficiente para gerar uma força contra eletromotriz capaz de restabelecer o equilíbrio. Os motores tipo série nunca devem funcionar sem carga, e raramente são usados com transmissão por correias, em que a carga pode ser removida.

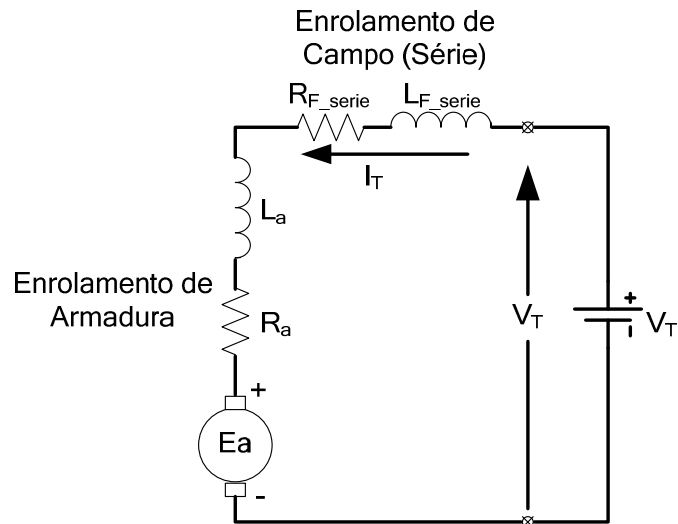


Figura 16 – Circuito equivalente para o motor série.

2.5.4 Motor com Excitação Composta

O motor com excitação composta é uma combinação dos motores tipo série e tipo derivação. O enrolamento de campo é composto por um enrolamento com muitas espiras de fio fino, ligado em paralelo com o enrolamento de armadura, e outro com poucas espiras de fio grosso, ligado em série com o enrolamento de armadura. A Figura 17 mostra o circuito elétrico para o motor com excitação composta.

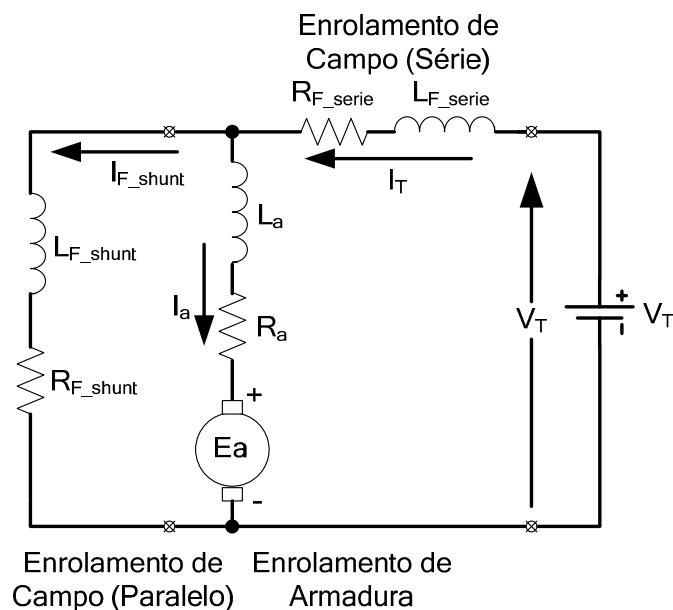


Figura 17 – Motor de Excitação Composta.

2.5.5 Curvas Características dos Motores CC

As curvas características de velocidade em função do torque para vários tipos de motores de corrente contínua são apresentadas na Figura 18. O motor série apresenta uma grande variação de velocidade à medida que aumenta o torque desenvolvido pelo motor.

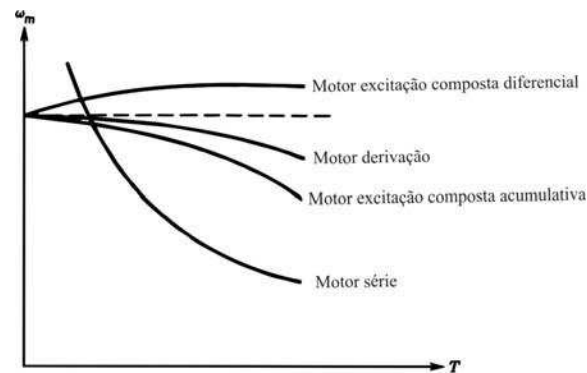


Figura 18 – Curvas de velocidade em função do torque para motores de corrente contínua.

A Figura 19 apresenta as curvas características de tensão por corrente em geradores de corrente contínua. Pode se observar que o motor CC sem carga não gera tensão nenhuma, pois sem carga não corrente no enrolamento de campo e não existindo o campo também não haverá tensão induzida.

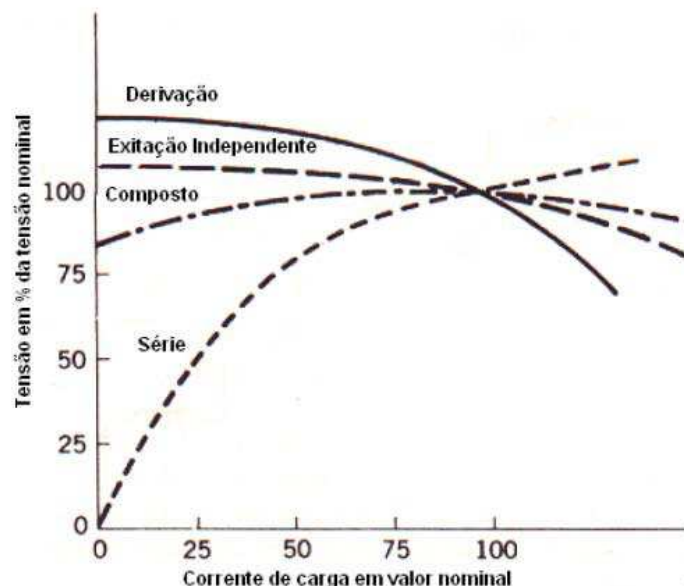


Figura 19 – Curvas de Tensão em Função da Corrente para Geradores de Corrente Contínua.

2.6 VELOCIDADE E INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR

O torque desenvolvido por um motor para movimentar uma determinada carga depende da intensidade de corrente que a armadura solicita da fonte de alimentação. Quanto maior a carga, maior deve ser o conjugado e consequentemente maior a intensidade de corrente. Se a carga for menor, o torque será menor e a intensidade de corrente também. Para se obter um torque maior, o motor necessita girar a uma velocidade menor. Portanto, a velocidade de um motor de corrente contínua depende da carga acoplada ao eixo.

O sentido de rotação de um motor depende do sentido do campo magnético e do sentido da corrente na armadura. Se for invertido o sentido do campo ou da corrente, a rotação do motor também inverterá. Entretanto, se os dois forem invertidos ao mesmo tempo, o motor continuará a girar no mesmo sentido.

2.7 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE UM MOTOR

A velocidade de um motor de corrente contínua depende da intensidade do campo magnético, do valor da tensão aplicada e da carga. Se a intensidade de campo diminui, a velocidade aumenta, tentando manter a força contra eletromotriz. Se o enrolamento de campo se abrisse, restaria apenas o magnetismo residual e a velocidade aumentaria perigosamente, tentando manter a força contra eletromotriz necessária para se opor à tensão aplicada. Com uma carga leve, ou sem carga, um circuito de campo aberto poderia causar um aumento de velocidade tal que o motor se despedaçaria. As lamínas do comutador e outras partes da máquina seriam arremessadas para longe podendo causar ferimentos graves nas pessoas próximas à máquina.

A velocidade do motor pode ser controlada através do controle da corrente de campo, utilizando um reostato, ou através do controle da tensão aplicada, utilizando-se conversores estáticos. Se uma fonte de tensão alternada, a rede de alimentação, por exemplo, for retificada, ela pode ser utilizada para converter uma fonte de alimentação alternada fixa em uma fonte de alimentação contínua variável. Através da variação da tensão aplicada ao motor de corrente contínua, é possível variar a velocidade de rotação do mesmo. A Figura 20 mostra um conversor estático muito utilizado para realizar este controle de velocidade, empregando retificadores controlados a tiristor para retificar a tensão alternada e variar a tensão contínua aplicada à máquina.

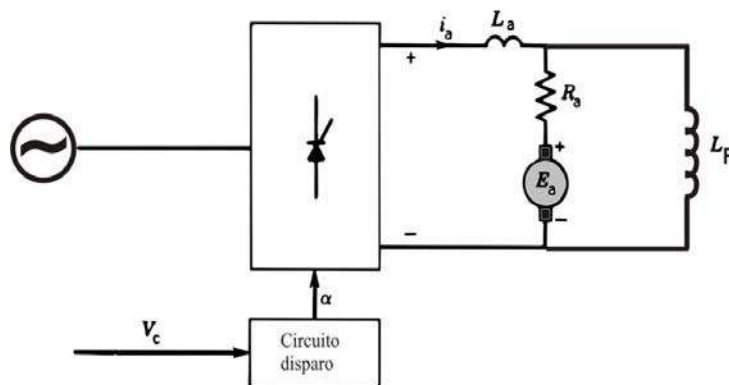


Figura 20 – Controle da velocidade do motor de corrente contínua.

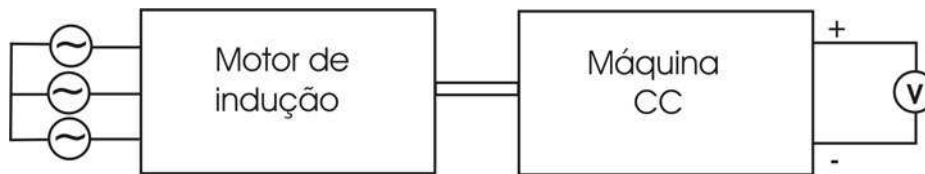
2.8 EXERCÍCIOS MÁQUINAS CC

- 1) Considere um gerador CC com enrolamento de campo em paralelo cuja resistência é igual a 80Ω . A resistência do enrolamento de armadura é igual a $0,1\Omega$. A potência nominal igual a 12kW , a tensão gerada igual a 100V e a velocidade nominal igual a 1000rpm . Determine:
 - a) O circuito elétrico equivalente;
 - b) A tensão nos terminais do gerador. **R: $V_t=88\text{V}$**
- 2) Considerando a máquina do exercício anterior, determine a corrente total fornecida à carga quando o gerador fornece potência nominal.
R: $118,9\text{A}$.
- 3) Um motor de derivação possui uma resistência de armadura igual a $0,2\Omega$, uma resistência de campo igual a 100Ω , uma força contra eletromotriz igual a 100V e uma tensão de alimentação igual a 110V . Determine:
 - a) O circuito elétrico equivalente.
 - b) A corrente de armadura. **R: $I_a=50\text{A}$**
 - c) A corrente de campo. **R: $I_f=1,1\text{A}$.**
 - d) A constante K_a , se o fluxo por pólo é igual a $0,02\text{wb}$ e a velocidade igual a 1200rpm .
R: $K_a=39,81$.
- 4) Considere um motor série cujo enrolamento de campo possui uma resistência igual a $0,1\Omega$ e o enrolamento de armadura possui uma resistência igual a $0,25\Omega$. Se a tensão de alimentação for igual a 230V , determine:
 - a) O circuito elétrico equivalente.
 - b) A corrente de armadura e a corrente de campo sabendo que a tensão gerada é igual a 225V . **R: $I_f=I_a=14,29\text{A}$.**
 - c) Determine a potência desenvolvida pelo motor. **R: $P_3=21\text{kW}$**
 - d) Sabendo que a velocidade é igual a 1200rpm , determine o torque desenvolvido pelo motor. **R: $T=25,6\text{N}$.**
- 5) Um motor CC série, 230V , 12cv , 1200rpm é conectado a uma fonte de alimentação de 230V , drena uma corrente igual a 40A , e gira a 1200rpm . Se a resistência de armadura é igual a $0,25\Omega$ e a resistência de campo igual a $0,1\Omega$, determine:
 - a) O circuito elétrico equivalente.
 - b) A potência e o torque desenvolvidos pelo motor. **R: $P=9,2\text{kW}$**
 - c) A potência se o motor drena 20A . **R: $P=4,6\text{kW}$**
- 6) Um motor derivação 50cv , 250V é conectado a uma fonte de alimentação de 230V e fornece potência à carga drenando uma corrente igual a 200A e girando a uma velocidade igual a 1200rpm . A resistência de armadura é igual a $0,2\Omega$ e a resistência de campo é de 115Ω . Determine:
 - a) O circuito equivalente.
 - b) A tensão gerada. **R: $E_a=190,4\text{V}$**
 - c) O torque de carga, sabendo que as perdas rotacionais são iguais a 500W .
R: $T=362\text{Nm}$
 - d) A eficiência do motor. **R: $\text{Rend}=0,989$.**

- 7) Um gerador derivação, 250V, 150kW, possui uma resistência de campo igual a 50Ω e uma resistência de armadura igual a $0,05\Omega$. Calcule:
- a) A corrente de plena carga. **R: $I_t=600A$**
 - b) A corrente de campo **R: $I_f=5A$**
 - c) A corrente de armadura **R: $I_a=605A$**
 - d) A tensão gerada na situação de plena carga. **R: $E_a=280,3V$**
- 8) Supondo excitação de campo constante, calcule a tensão a vazio de um gerador com excitação independente cuja tensão de armadura é 150V em uma velocidade de 1800 rpm, quando:
- a) A velocidade aumenta para 2000 rpm. **R: $E_{a_{2000}}=166,7V$**
 - b) A velocidade é reduzida para 1600 rpm. **R: $E_{a_{1600}}=133,3V$**
- 9) A regulação de tensão de um gerador CC de 250V é 10,5%. Calcule a tensão do gerador sem carga. **R: $V_{sem_carga}=276,3V$**
- 10) A tensão sem carga de um gerador CC é 135V, e sua tensão a plena carga é 125V. Calcule a regulação de tensão para o gerador. **R: $Reg=8\%$**

3 AULAS PRÁTICAS MÁQUINAS CC

3.1 AULA PRÁTICA 1 : GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA



Montar o circuito acima esquematizado.

Alimentar o enrolamento de campo derivação ou “shunt” com uma fonte de alimentação cc independente. Que tipo de gerador utiliza esta configuração:

Alimentar o motor de indução, regular a corrente de campo e medir a tensão gerada.

I_{campo}	V_{gerada}
0	
0,06 A	
0,08 A	

Desconectar o enrolamento de campo da fonte cc independente e conectar o enrolamento derivação em paralelo com o enrolamento de armadura. Que tipo de gerador utiliza esta configuração: _____

Alimentar o motor de indução e medir a tensão gerada.

$V_G = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Desconectar o enrolamento de campo derivação em paralelo com o enrolamento de armadura.

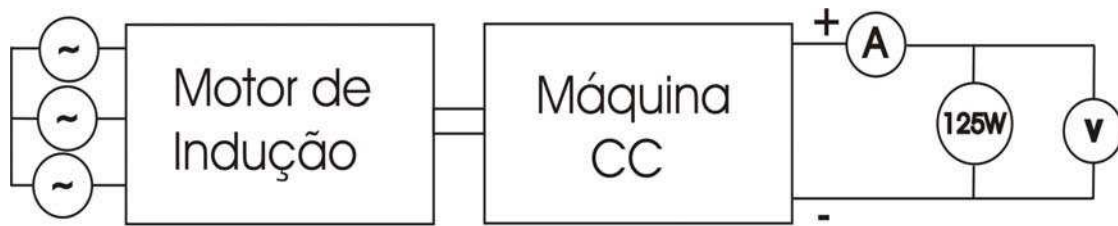
Conectar o enrolamento de campo série em série com o enrolamento de armadura. Que tipo de gerador utiliza esta configuração: _____

Alimentar o motor de indução e medir a tensão gerada.

$V_G = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Explicar a diferença nos valores para as tensões geradas nas três configurações. Por que a tensão gerada na configuração com enrolamento de campo série é aproximadamente igual à tensão gerada na configuração com enrolamento de campo com excitação independente quando a corrente de campo é zero?

3.2 AULA PRÁTICA 2 : GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM CARGA



Montar o circuito acima esquematizado.

Conectar o enrolamento de campo derivação em paralelo com o enrolamento de armadura

Alimentar o motor de indução e medir a tensão gerada e a corrente fornecida à carga.

$V_G = \underline{\hspace{2cm}}$ V $I_G = \underline{\hspace{2cm}}$ A

Aumentar a carga para 150W. Alimentar o motor de indução e medir a tensão gerada e a corrente fornecida à carga.

$V_G = \underline{\hspace{2cm}}$ V $I_G = \underline{\hspace{2cm}}$ A

Aumentar a carga para 300W. Alimentar o motor de indução e medir a tensão gerada e a corrente fornecida à carga.

$V_G = \underline{\hspace{2cm}}$ V $I_G = \underline{\hspace{2cm}}$ A

Explicar o que aconteceu durante a realização do ensaio. Por que a corrente aumenta e a tensão gerada diminui?

4 MÁQUINA SÍNCRONA

4.1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são responsáveis pela maior parcela do processamento de energia elétrica no Brasil. Dados da Eletrobrás apontam o setor industrial como responsável pelo consumo de quase metade da energia elétrica do país. A Figura 21 mostra o gráfico do consumo de energia elétrica no Brasil por setores, tendo como ano base 2008.



Fonte: Eletrobrás, 2008

Figura 21 - Consumo de energia elétrica no Brasil.

Da energia elétrica processada no setor industrial, 55% é consumida pelos motores elétricos. Isto significa que a participação do motor elétrico, apenas no setor industrial, é estimada em aproximadamente 25% do consumo global de energia elétrica. Considerando os demais setores, o motor elétrico é responsável por no mínimo 35% da energia consumida no país. A Figura 22 mostra o gráfico dos consumidores mais importantes do setor industrial, ano base 2008.



Fonte: Eletrobrás, 2008

Figura 22 - Consumidores mais importantes do setor industrial

Ao mesmo tempo em que se constata a grande importância dos motores elétricos, por serem responsáveis pelo processamento de mais de 1/3 da energia elétrica, é evidente que medidas adotadas visando um aumento da eficiência no processo de operação, resultarão em economia de energia elétrica. A utilização adequada desses motores traz benefícios imediatos aos usuários e a sociedade brasileira.

4.2 MÁQUINA SÍNCRONA

O enrolamento de campo na máquina síncrona encontra-se no rotor, parte rotacionária da máquina. O enrolamento de armadura encontra-se no estator, parte estacionária. O rotor nas máquinas síncronas pode ser do tipo saliente ou liso. A Figura 23 mostra um rotor com pólos salientes.

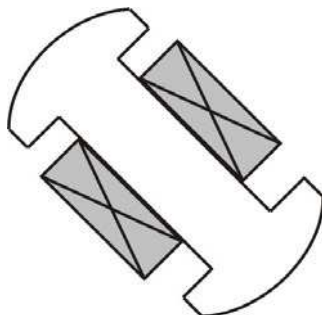


Figura 23 – Rotor de uma máquina síncrona com pólos do tipo saliente.

O rotor da máquina síncrona gira a uma velocidade constante em regime permanente. Esta é a principal característica para estas máquinas. O campo magnético girante, resultante da interação entre as forças magneto motrizes devido às correntes alternadas senoidais trifásicas, gira à mesma velocidade do rotor. A velocidade de rotação do rotor e do campo magnético girante é denominada velocidade síncrona. A velocidade síncrona é determinada pela equação (7).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (7)$$

n_s – velocidade síncrona em rpm.

f – frequência em Hz.

P – número de pólos da máquina.

O enrolamento de campo é alimentado com corrente contínua dando origem ao fluxo magnético no entreferro. Esta alimentação é realizada, principalmente, através de dois anéis coletores girantes, localizados no eixo do rotor, que fazem contato com escovas fixas. A excitação pode ser realizada por uma rede de corrente contínua ou por uma rede de corrente alternada retificada.

Aplicações:

As máquinas síncronas são usadas primeiramente como unidades geradoras em usinas hidroelétricas, usinas nucleares ou termoelétricas.

Motores síncronos de grande porte são utilizados como bombas e em aplicações de potência fracionária como relógios elétricos, temporizadores e outras aplicações.

Na indústria, os motores síncronos são utilizados em aplicações em que a velocidade constante é necessária.

Gerador Síncrono

A máquina síncrona pode funcionar tanto como gerador quanto como motor. Quando a máquina síncrona funciona como gerador, energia mecânica é aplicada ao eixo da máquina, dando origem ao movimento de rotação. Dessa forma, o campo magnético que atravessa as bobinas do estator varia de forma senoidal, na frequência de rotação do rotor, induzindo tensões alternadas

senoidais nos enrolamentos de armadura. A tensão induzida em cada enrolamento é dada pela equação (8).

$$E_f = 4,44 \cdot f \cdot \phi_f \cdot N \cdot K_w \quad (8)$$

E_f – Tensão eficaz por fase.

Φ_f – fluxo por pólo.

N – número de espiras do enrolamento.

K_w – Fator de enrolamento. Para a maioria das máquinas trifásicas esse fator varia de 0,85 a 0,95.

Paralelismo de Geradores Síncronos

Um sistema confiável normalmente consiste de várias estações geradoras operando em paralelo. As principais vantagens da operação em paralelo são:

Se uma unidade de grande potência deixar de funcionar, todo o sistema também deixará de funcionar.

Uma unidade, para funcionar com o rendimento máximo, deverá ser carregada até sua capacidade nominal. Várias unidades em paralelo podem ser removidas ou acrescentadas de acordo com a demanda.

Se há necessidade de reparo ou de uma parada geral para manutenção, as unidades menores facilitam estas operações.

Quando a demanda média aumenta, instalam-se novas unidades geradoras em paralelo para acompanhar o acréscimo da demanda.

Há limites físicos e econômicos para a capacidade de uma unidade geradora única.

Pelas razões acima citadas, aconselha-se a operação em paralelo.

Existem algumas condições necessárias para a operação em paralelo de geradores. As principais são:

Cada gerador deve ter a mesma tensão nominal e a mesma regulação de tensão.

As polaridades de todos os geradores ligados em paralelo devem ser tais que estejam em oposição, isto é, mais com mais, menos com menos.

As tensões geradas devem ser mais elevadas que a tensão do barramento.

As formas de ondas devem ser as mesmas.

As frequências devem ser iguais.

Para máquinas polifásicas, a sequência de fase da máquina que entra no sistema deve ser a mesma do barramento.

A Figura 24 ilustra a operação em paralelo de dois geradores derivação.

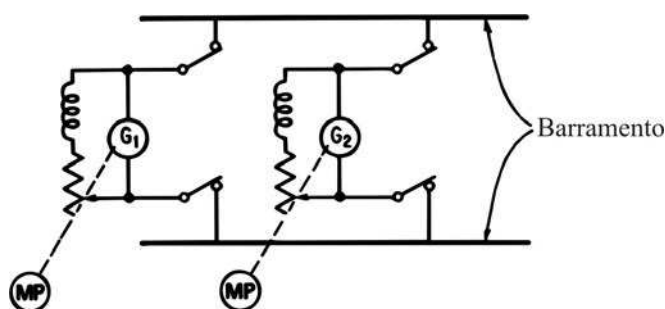


Figura 24 – Dois geradores - derivação em paralelo.

A excitatriz é a fonte responsável pelo fornecimento da energia para o enrolamento de campo na máquina síncrona. As tensões de fornecimento variam de 50 a 1.500V, e as potências das excitatrizes situam-se entre 1 a 5% da potência da máquina.

Excitatriz rotativa

As excitatrizes rotativas são geralmente geradores cc shunt derivação ou geradores cc com excitação de campo composta. São montadas no eixo da máquina principal, fornecendo alimentação contínua ao enrolamento de campo através de escovas e anéis coletores. A Figura 25 ilustra uma excitatriz rotativa.

A resposta da excitatriz rotativa é lenta, possui elevado nível de rádio-interferência e necessita de manutenção nas escovas e no comutador do gerador de corrente contínua.

A tensão de saída do gerador síncrono é realimentada para que através do controle da excitação do campo da excitatriz, o regulador de tensão regule o nível da tensão de saída do gerador.

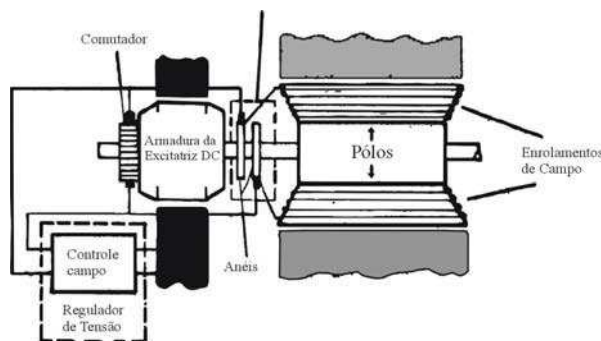


Figura 25 – Excitatriz rotativa

Excitatriz Estática

A excitatriz estática consiste em um regulador eletrônico, composto de uma ponte tiristorizada e circuitos de comando e controle, capaz de fornecer a excitação necessária ao enrolamento de campo da máquina síncrona através de anéis coletores e escovas. Esta excitatriz é uma das mais utilizadas atualmente. Possui resposta rápida às variações sentidas na tensão de saída do gerador. Entretanto, possui elevado nível de rádio-interferência e distorção harmônica da tensão de saída. A Figura 26 apresenta uma ilustração da excitatriz estática.

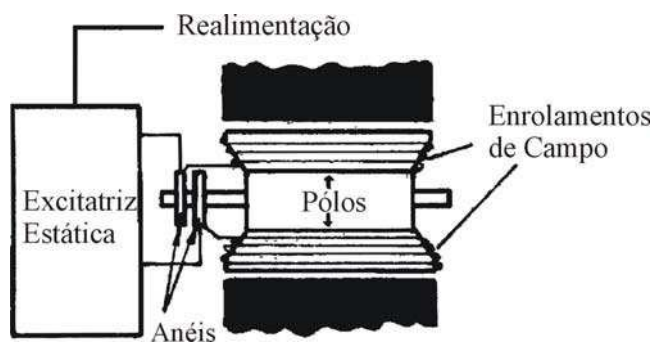


Figura 26– Excitatriz Estática.

Excitatriz sem escovas

A excitatriz sem escovas é mais conhecida pela expressão “brushless”, que em inglês significa ausência de escovas. O princípio de funcionamento é baseado na lei da indução

eletromagnética. O campo da excitatriz é fixo e montado em torno do eixo da máquina, sendo a armadura da excitatriz montada sobre o eixo. Ao executar o movimento de rotação, o campo magnético na armadura da excitatriz varia, induzindo uma força eletromotriz alternada em suas bobinas. Esta fem alternada é retificada através de uma ponte de diodos rotativa e alimenta o enrolamento de campo principal da máquina síncrona. A Figura 27 ilustra o que foi acima descrito. A Figura 28 apresenta em detalhes os circuitos elétricos e eletrônicos envolvidos.

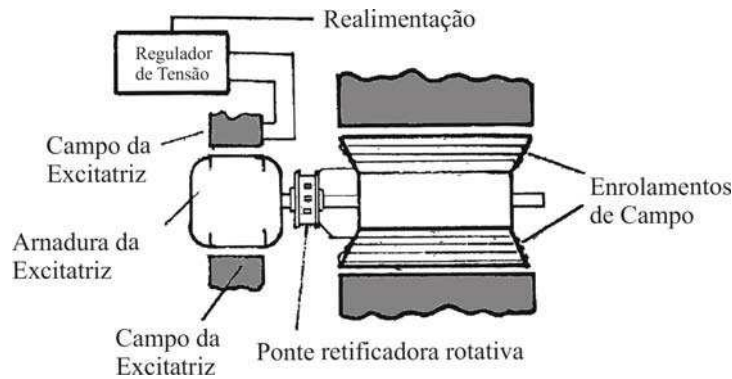


Figura 27– Excitatriz sem escovas.

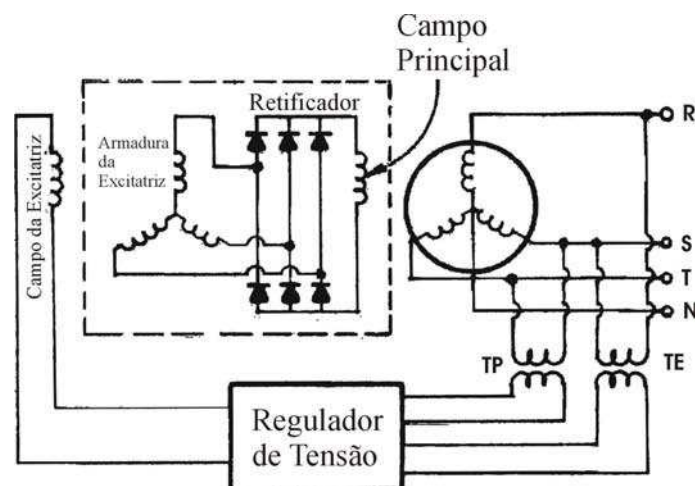


Figura 28 – Circuitos que compõe a excitatriz sem escovas.

Motor síncrono

O motor síncrono não entra em funcionamento assim que conectado à rede de alimentação. Ao contrário, ele entra em processo de vibração. Vamos supor um motor síncrono com 2 pólos, 3 fases e alimentado a partir de uma rede de alimentação trifásica 380V/60Hz. As correntes no estator irão produzir um campo magnético girante que irá girar a 3600rpm. Esse campo gira tão rápido que antes que o rotor inicie o movimento de rotação, o sentido do torque desenvolvido pelo rotor já inverteu o sentido.

O motor síncrono pode iniciar o movimento de rotação de duas formas:

Utilizando uma fonte de alimentação com frequência variável.

Como um motor de indução monofásico.

A Figura 29 mostra o esquema de partida do motor síncrono utilizando um inversor de frequência. O motor parte com uma frequência baixa, de maneira que o rotor consegue acompanhar o campo magnético girante.



Figura 29– Método de partida do motor síncrono através de inversor de frequência.

Para partir o motor síncrono como um motor de indução, o enrolamento de campo não é excitado durante a partida e um enrolamento auxiliar é providenciado de modo a estabelecer um torque de partida semelhante ao que ocorre com o motor de indução monofásico. A Figura 30 mostra o esquema de partida de um motor síncrono com um enrolamento auxiliar.

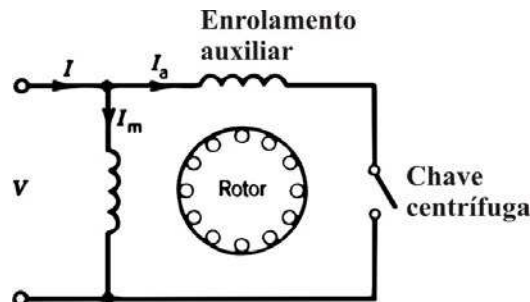


Figura 30– Partida do motor síncrono como motor de indução monofásico.

Curvas V para o motor síncrono

Uma característica importante do motor síncrono é que ele pode solicitar da rede uma corrente em atraso ou em avanço, dependendo do controle da corrente de campo. Através do controle desta corrente de campo, é possível corrigir o fator de potência de uma determinada planta industrial.

O fator de potência com o qual um motor síncrono drena corrente da rede de alimentação pode ser controlado. A Figura 31 apresenta as curvas que expressam a relação entre a corrente de armadura, a corrente de campo e o fator de potência, conhecida como curvas V. Para uma potência constante, a corrente de armadura é mínima quando o fator de potência é unitário, e aumenta conforme o fator de potência decresce.

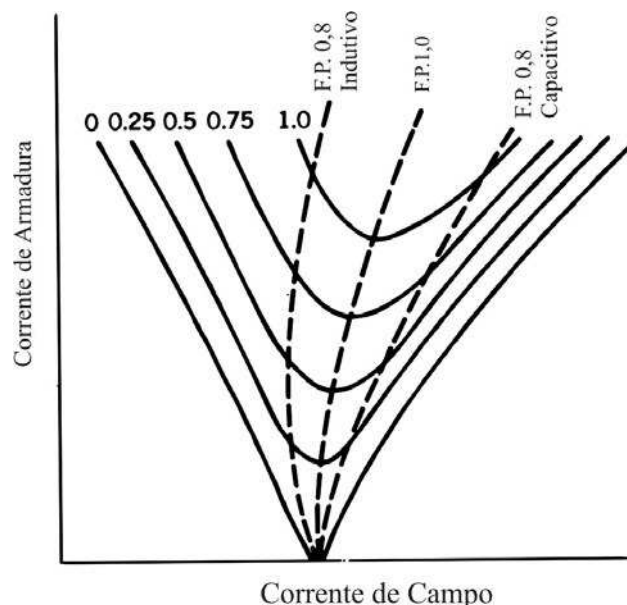


Figura 31 - Curvas V para um motor síncrono.

Fator de potência

Aparentemente, o produto entre a tensão e a corrente seria a potência necessária para o motor executar o seu trabalho. Mas ocorre que, para o motor elétrico executar a transformação de energia elétrica em mecânica, ele necessita magnetizar os circuitos magnéticos do rotor e do estator.

Desta forma, este produto entre a tensão e a corrente engloba dois componentes distintos de potência:

Um componente relacionado ao trabalho mecânico e perdas.

Um componente para assegurar a existência dos campos magnéticos

Potência aparente

A potência aparente é definida como o produto entre a tensão e a corrente que é fornecida ao motor elétrico e é expressa em volt-ampère (VA). Para circuitos monofásicos é dada pela equação (9). Para circuitos trifásicos, pela equação (10).

$$S = V \cdot I \quad (9)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (10)$$

Potência reativa

A potência reativa é definida como a parcela de potência associada à magnetização dos circuitos magnéticos e é expressa em volt-ampère reativo (VAr). Para circuitos monofásicos, é dada pela equação (11). Para circuitos trifásicos, pela equação (12).

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (11)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (12)$$

Potência ativa

A potência ativa é definida como a parcela de potência que o motor realmente converte em energia mecânica, utilizada para acionar a carga, associada às perdas internas. Para circuitos monofásicos é dada pela equação (13). Para circuitos trifásicos, pela equação (14). A unidade de potência ativa é o watt.

$$P = V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (13)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \theta \quad (14)$$

Triângulo de potências

O triângulo de potências é um recurso gráfico utilizado para representar as três potências: aparente, ativa e reativa. O fato da potência ativa e potência reativa representarem grandezas diferentes requer que elas estejam dispostas em eixos de referência distintos. É comum então representarmos graficamente a potência ativa na direção horizontal e a potência reativa na direção vertical. A potência aparente é a soma vetorial das duas primeiras. Dessa forma, o gráfico tem a forma de um triângulo retângulo denominado triângulo de potências, como mostra a Figura 32.

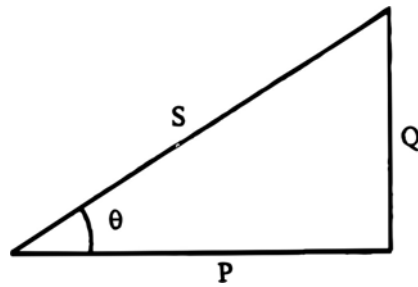


Figura 32 – Triângulo de potências.

A equação (15) resulta da composição vetorial dessas três potências.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (15)$$

O ângulo θ representa o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente em um circuito elétrico em corrente alternada. Dessa maneira, a equação (16) define matematicamente o fator de potência.

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S} \quad (16)$$

É importante, tanto para o usuário quanto para a companhia fornecedora de energia elétrica, que se drene corrente com fator de potência elevado. A legislação atual exige que os consumidores operem com um fator de potência maior que 0,92. Abaixo desse valor existe aplicação de multa, de acordo com a portaria no 1.569, de 1993, DNAEE.

A correção do fator de potência pode ser feita através da instalação de capacitores individuais próximos às cargas reativas, de um banco de capacitores ou utilizando-se motores síncronos trabalhando de forma superexcitada. A maneira pela qual será realizada a correção do fator de potência deve ser resultado de um estudo técnico e econômico. Entretanto, a forma mais comumente empregada é a instalação de um banco de capacitores com comutação automática.

Correção do fator de potência

Como mencionado, a correção do fator de potência pode ser feita de várias maneiras.

O uso de capacitores é o mais empregado, mas alguns procedimentos operacionais devem também ser levados em consideração. Aspectos como:

1. Reavaliar o tamanho dos motores utilizados e a real necessidade do sistema;
2. Analisar as possibilidades de um aproveitamento mais racional dos motores que trabalham com pouca carga ou em vazio durante alguns períodos de tempo;
3. Verificar a possibilidade de desligar os motores que trabalham em vazio e religá-los novamente, quando for necessário;
4. Verificar a possibilidade de motores superdimensionados que possuem chave de partida estrela-triângulo atender a carga a ser acionada sem se efetuar a transição de estrela para triângulo. Para uma mesma carga, o fator de potência aumenta quando a tensão de alimentação diminui;

A instalação de capacitores deve ser bem analisada, pois, em determinadas situações, podem provocar efeitos indesejáveis.

Basicamente, existem dois métodos para a correção do fator de potência pelo uso de capacitores:

1. Um único banco de capacitores é instalado na entrada do sistema de distribuição, fazendo a correção global do fator de potência;

2. Vários bancos menores de capacitores são instalados junto aos motores de maior capacidade.

Ambos os métodos apresentam vantagens. O primeiro reduz o número de capacitores. Entretanto, eles devem possuir dispositivos de chaveamento, de modo que possam ser removidos parcialmente, conforme a carga elétrica varie ao longo do dia.

Sobrecorreção (excesso de correção) pode ser um problema com este método. Se os capacitores forem dimensionados considerando-se a plena carga de todo o sistema, e este possuir grandes cargas que serão eventualmente removidas, o banco de capacitores injetará o excesso de reativo na rede da concessionária, ocasionando sobretensões. E isto é tão indesejável quanto solicitar reativo em demasia.

O segundo método faz a correção individualizada nos pontos onde estão instalados os grandes motores. A vantagem deste método é que a correção só é realizada quando o motor está em operação.

Cálculo da potência reativa

A potência reativa (kVAr) de capacitores necessária para corrigir o fator de potência, no ponto da rede onde está ligado um motor com baixo valor de fator de potência, para um novo valor corrigido, é determinado pelo cálculo da diferença de kVAr nas duas condições.

A Figura 33 mostra as duas situações, onde os índices 1 e 2 correspondem aos casos de fator de potência corrigido e sem correção, respectivamente.

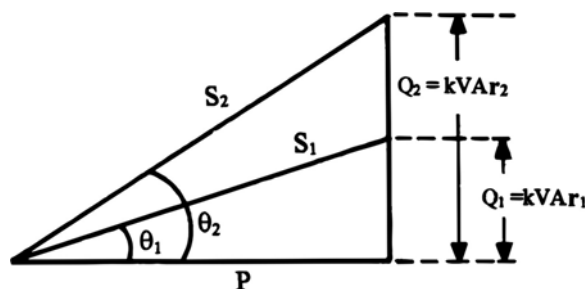


Figura 33 – Triângulo de potências para cálculo da correção do fator de potência.

Exemplo: Considere um motor acionando uma carga de 50CV, tal que sua eficiência para esta condição de carga é 91%. O fator de potência de operação é 0,87 e deseja-se corrigi-lo para 0,95.

A potência ativa que o motor solicita à rede é dada por:

$$P = \frac{CV \cdot 736}{\eta} = \frac{50 \cdot 736}{0,91} = 40,44kW$$

Calcula-se a potência aparente para ambos os fatores de potência.

$$S_2 = \frac{40,44}{0,87} = 46,48kVA$$

$$S_1 = \frac{40,44}{0,95} = 42,57kVA$$

Calcula-se a potência reativa para ambas situações.

$$Q_2 = \sqrt{(46,48^2 - 40,44^2)} = 22,91kVAr$$

$$Q_1 = \sqrt{(42,57^2 - 40,44^2)} = 13,29kVAr$$

Finalmente, a potência reativa de capacitores necessária para corrigir o fator de potência no ponto da rede onde está instalado o motor é:

$$kVar_{capacitores} = Q_2 - Q_1 = 22,91 - 13,29 = 9,63kVar$$

Embora seja comum dizer-se que o fator de potência do motor foi corrigido, isto não é correto. O que se corrige é o fator de potência no ponto da rede onde está conectado o motor. O motor continuará exigindo a mesma potência ativa e a mesma potência reativa para executar seu trabalho. Assim, o motor continuará, individualmente, com um fator de potência abaixo do permitido. Entretanto, a rede neste ponto – conjunto motor e banco de capacitores – possui fator de potência elevado. A Figura 34 ilustra a distribuição de potências ativa e reativa antes e após a correção do fator de potência para o exemplo considerado.

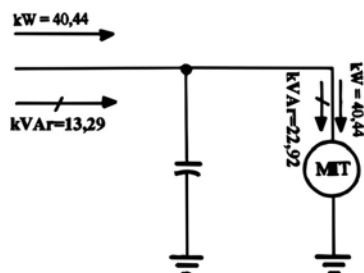


Figura 34 – Influência da instalação de capacitores na potência reativa da rede.

Modelo de circuito equivalente

A corrente de campo i_f produz um fluxo Φ_f no entreferro. A corrente no estator i_a produz um fluxo Φ_{ar} . Parte do fluxo produzido pela corrente de estator se concatena apenas com o enrolamento do estator. Este fluxo é dito disperso. A maior parte do fluxo produzido pelo enrolamento de armadura, Φ_{ar} , se estabelece no entreferro e se concatena com o fluxo produzido pelo enrolamento de campo. O fluxo resultante, Φ_r , produz a tensão resultante E_r . A equação (17) expressa o que foi dito.

$$E_r = E_{ar} + E_f \quad (17)$$

A Figura 35 apresenta um modelo de circuito equivalente em que a fonte de tensão E_f representa a contribuição devido ao fluxo produzido pelo enrolamento de campo e a impedância $X_s = X_{ar} + X_{al}$ composta pelas contribuições devido ao fluxo de dispersão e devido ao fluxo que se distribui no entreferro. A resistência R_a do enrolamento de armadura também é considerada nesse modelo equivalente.

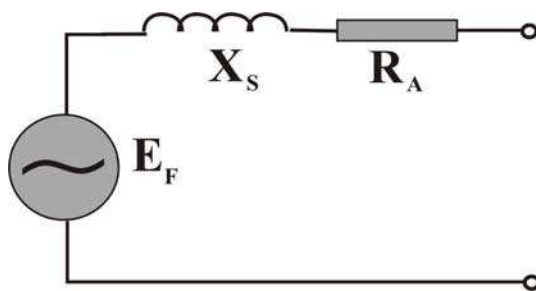


Figura 35 – Circuito equivalente para a máquina síncrona.

Característica de torque e potência

Apesar de girar a uma velocidade constante, dita velocidade síncrona, a máquina síncrona perde sincronismo e pára se um torque muito elevado for aplicado ao eixo do motor. O ângulo de torque δ , ângulo entre a tensão aplicada e a tensão induzida devido ao fluxo de campo, não deve exceder 90 graus. A curva de torque em função do ângulo de torque é obtida através da equação (18).

$$T = T_{\max} \sin(\delta) \quad (18)$$

O funcionamento do motor síncrono é função desse ângulo. A potência relaciona-se com o torque através de uma constante. Dessa forma, variam igualmente com a variação do ângulo de torque. A Figura 36 mostra um gráfico da potência e do torque em função do ângulo de torque.

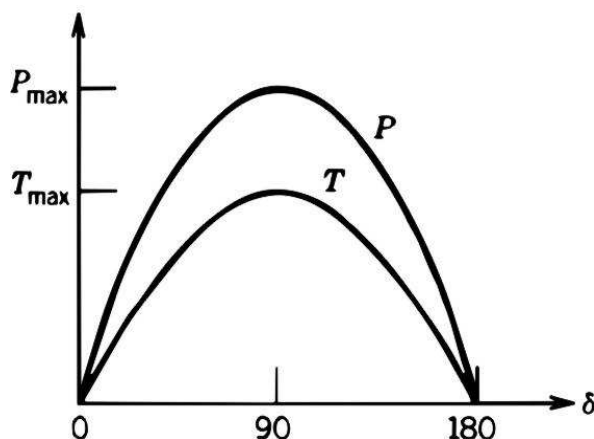


Figura 36– Gráfico da potência e do torque em função do ângulo de torque.

Controle de velocidade do motor síncrono

O controle de velocidade do motor síncrono pode ser realizado através da variação da frequência de alimentação. Para qualquer frequência fixa a velocidade de rotação é constante, a menos que o motor perca sincronismo.

Existem dois métodos normalmente empregados para controle da velocidade do motor síncrono:

A velocidade é controlada diretamente através da variação do par tensão e frequência de alimentação do motor síncrono.

A frequência é ajustada através do controle da velocidade do motor em malha fechada e o motor é dito autocontrolado.

Para controle da velocidade através da variação da frequência e da tensão utiliza-se comumente um inversor de frequência como mostra a Figura 37.



Figura 37– Método com variação da frequência para controle da velocidade.

Vantagens e desvantagens do motor síncrono

As principais vantagens e desvantagens do motor síncrono estão resumidas na tabela abaixo.

Vantagens	Desvantagens
Permitem fácil controle do fator de potência através da corrente de campo. Podem auxiliar na correção do fator de potência.	Na partida, não poderá partir como um motor síncrono propriamente dito, porque não possui conjugado de partida.
Em elevadas potências e baixas velocidades, são mais econômicos.	Necessidade de usar corrente contínua para a sua excitação.
Apresentam bom rendimento, mesmo trabalhando com carga parcial.	Uma perturbação no sistema poderá fazer com que o motor pare devido à perda do sincronismo.
Para baixas velocidades, possuem menor peso do que seu equivalente assíncrono.	O controle e automação de um motor síncrono não é tão simples quanto o de um motor assíncrono.

Motor síncrono com imã permanente

O motor síncrono com imã permanente no rotor apresenta um elevado rendimento, baixo nível de ruído e tamanho reduzido. A presença de imãs de terras raras elimina a necessidade de alimentar o circuito de campo, eliminando a circulação de corrente no rotor. Reduzem-se assim as perdas por efeito Joule no rotor e a temperatura de operação do motor. Por trabalhar mais frio, aumenta-se a vida útil da máquina. Diminui-se também o tamanho do motor.

Este motor foi projetado para funcionar com inversor de frequência, estando apto para funcionar em ampla faixa de velocidade com torque constante. A Figura 38 apresenta a curva de torque em função da velocidade para o motor síncrono com imã permanente.

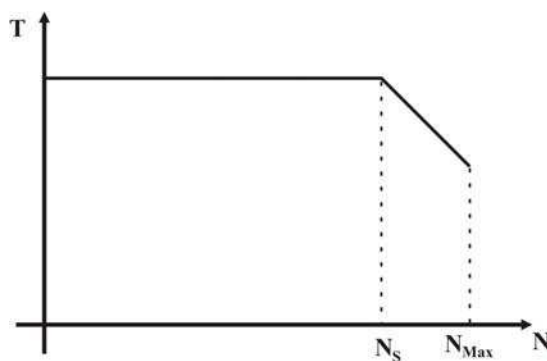
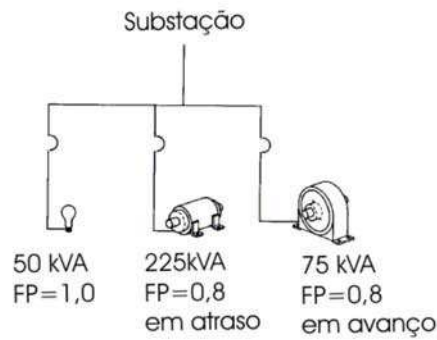


Figura 38 – Curva de torque em função da velocidade.

As aplicações para este motor são aquelas em que se requer torque constante para uma ampla faixa de velocidade. Alguns exemplos de aplicação para o motor síncrono com imã permanente são: bombas, sistemas de ventilação, elevadores, compressores e esteira transportadora.

4.3 EXERCÍCIOS MÁQUINAS SÍNCRONAS

- 1) Considere uma máquina síncrona com 8 pólos. Se a fonte de alimentação deste motor for uma fonte de tensão 110V/50Hz, qual a velocidade de rotação deste motor? **R: $n=750\text{rpm}$**
- 2) Considere uma máquina síncrona de 4 pólos sendo acionada a 1800 rpm por uma máquina motriz. Se o número de espiras de um enrolamento da máquina for igual a 250, o fator de enrolamento igual a 0,9 e o fluxo pó pólo igual a 10^{-3} Wb, qual a tensão gerada nesse enrolamento? **R: $E_f=59,94\text{V}$**
- 3) Por que o motor síncrono não entra funcionamento assim que conectado a uma fonte de alimentação? Quais as possibilidades para partida do motor síncrono?
- 4) É possível que a máquina síncrona perca o sincronismo e pare de girar? Explique.
- 5) Quais as vantagens e desvantagens da máquina síncrona?
- 6) Em uma indústria, uma máquina síncrona é instalada para melhorar o fator de potência da instalação. Sabendo que nessa indústria, existem 800kVA de motores de indução, com fator de potência igual a 0,82 em atraso. A potência para a máquina síncrona a ser instalada é 500kVA, com fator de potência unitário. Qual o fator de potência da indústria após a instalação da máquina síncrona? **R: 0,93 Ind.**
- 7) Um motor síncrono de 2 pólos, alimentado a partir da rede de alimentação de 220V e 60Hz foi convertido em um motor síncrono de 6 pólos. Qual o aumento percentual na velocidade do motor? **R: $X\%=66,67$ diminuição.**
- 8) Um alternador com 16 pólos é movimentado numa velocidade de 3000 rpm. Calcule a frequência gerada na armadura. **R: $f=400\text{Hz}$**
- 9) Uma fábrica drena uma carga em atraso de 2000kW a um fator de potência de 0,6 a partir de uma rede de 6.000V. Um compensador síncrono é adquirido para elevar, até a unidade, o fator de potência total. Imaginando as perdas do compensador síncrono iguais a 275kW, calcule:
 - a) Os KVARs originais em atraso. **R: $Q=2,66\text{MVar}$**
 - b) Os KVARs de correção necessários para trazer o fator de potência a um valor unitário. **R: $Q=2,66\text{MVar}$**
 - c) A capacidade em KVA do compensador síncrono e seu fator de potência. **R: $S=2,67\text{MVA}$ $\text{FP}=0,103$ AD.**
- 10) Considere um motor acionando uma carga de 20CV, tal que sua eficiência para esta condição de carga é 93%. O fator de potência de operação é 0,89 e deseja-se corrigi-lo para 0,93. Qual a potência reativa de capacitores necessária? **R: $Q_c=1,854\text{KVar}$**
- 11) Considere a situação abaixo ilustrada. Calcule o fator de potência e a potência aparente fornecida pela subestação. Sugestão: Traçar o triângulo de potência para cada carga individual.



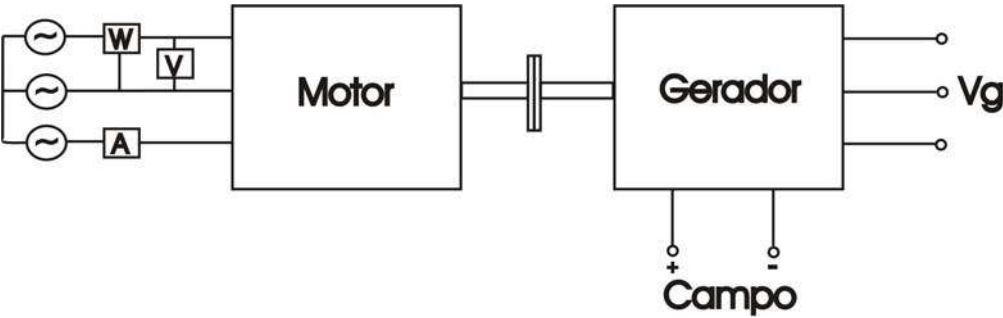
R: St=303,64KVA FP=0,95 AT.

- 12) Em uma indústria, uma máquina síncrona é instalada para melhorar o fator de potência da instalação. Sabendo que nessa indústria, existe um motor de indução de 150kVA, com fator de potência igual a 0,81 em atraso, existe um outro motor de indução de 250kVA, com fator de potência igual a 0,75 em atraso e um motor de indução de 350kVA, com fator de potência igual a 0,69 em atraso. A potência para a máquina síncrona a ser instalada é 500kVA, com fator de potência 0,95 em avanço. Qual o fator de potência da indústria após a instalação da máquina síncrona? **R: St=1083,77KVA FP=0,95 AT.**

5 AULAS PRÁRICAS MÁQUINAS SÍNCRONAS

5.1 EXPERIMENTO 1

Montar o circuito abaixo nas configurações estrela e triângulo para o gerador



Preencher a tabela

V(campo)	Vg em Y (V)	Vg em Δ (V)	I (A)
2			
4			
6			
8			
8,2			

Comentários:

5.2 EXPERIMENTO 2

Material Necessário:

- 1 motor de indução trifásico
- 1 gerador síncrono
- 1 wattímetro trifásico
- 1 varímetro trifásico
- 3 amperímetro
- 1 voltímetro
- 2 lâmpadas de 25W e 1 lâmpada de 100W
- 1 fonte de alimentação cc regulável.

Montar o circuito abaixo esquematizado. A saída do gerador deve estar ligada em Δ .

Alimentar o motor de indução sem excitar o campo do gerador. Calcular o fator de potência para esta situação.

$P =$ _____ $Q =$ _____ $S =$ _____ F.P. = _____

Variar a tensão de alimentação do campo até que a tensão de saída seja igual a 220V. Medir o fator de potência para esta situação.

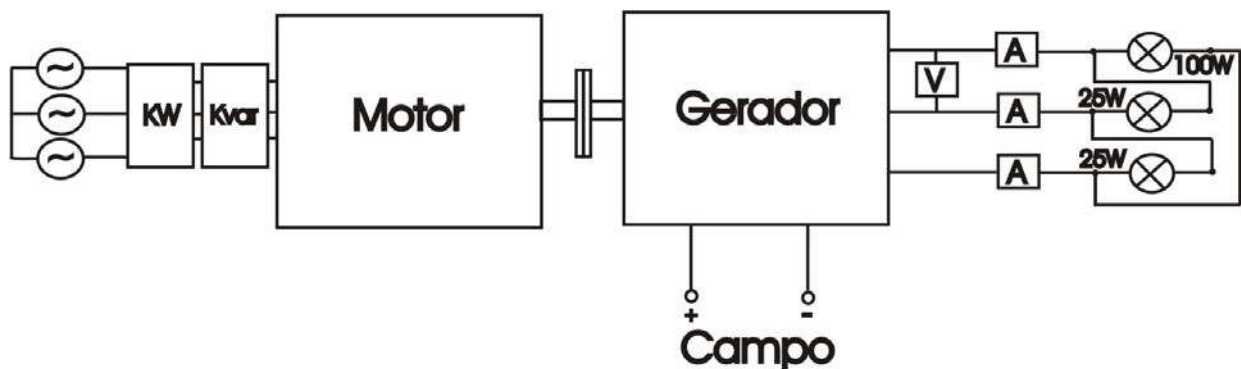
$P =$ _____ $Q =$ _____ $S =$ _____ F.P. = _____

Medir as correntes nos três amperímetros. Explicar o resultado obtido.

$A_1 =$ _____ A $A_2 =$ _____ A $A_3 =$ _____ A

Por que a potência ativa medida no item 3 é maior que a potência ativa medida no item 2? Explicar esta variação nas medidas de potência ativa.

Por que a potência reativa medida no item 3 é aproximadamente igual a potência reativa medida no item 2? Explicar este resultado.



6 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

6.1 INTRODUÇÃO

A máquina assíncrona é, dentre as máquinas elétricas girantes, a mais utilizada no setor industrial. Tanto o rotor quanto o estator conduzem corrente alternada. A corrente que circula pelo rotor é uma corrente induzida devido a um campo magnético variável em relação ao enrolamento do rotor. Este campo magnético variável em relação ao enrolamento do rotor é devido à diferença de velocidade de rotação do rotor e do campo magnético girante. Por isso a nomenclatura máquina de indução. A máquina de indução pode funcionar tanto como motor quanto como gerador. Entretanto, as características da máquina funcionando como gerador não são satisfatórias e a máquina é extensivamente utilizada como motor.

Ao contrário da máquina de corrente contínua, a máquina de indução possui um entreferro uniforme. O rotor pode possuir uma construção tipo gaiola de esquilo ou tipo bobinado. As bobinas do estator estão distribuídas ao longo do entreferro de modo a melhor aproveitar o material ferromagnético e assim melhorar a distribuição de força magneto motriz, suavizando o torque desenvolvido pela máquina. A Figura 39(a) mostra uma representação dos enrolamentos trifásicos distribuídos representados por três enrolamentos concentrados. A Figura 39(b) mostra os enrolamentos conectados em estrela (Y) e a Figura 39(c) mostra os enrolamentos conectados em triângulo (Δ).

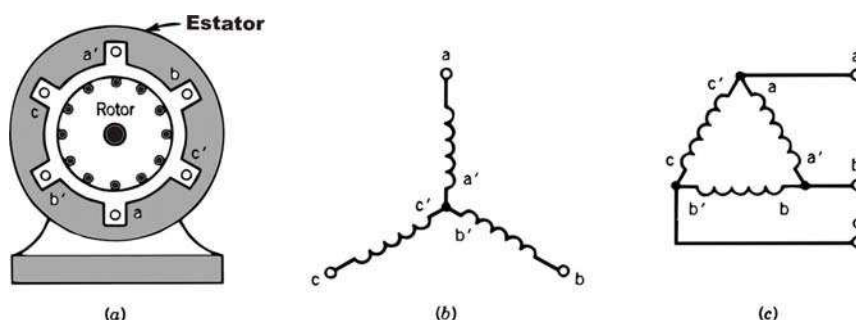


Figura 39 – (a) Vista em corte da máquina assíncrona. (b) Enrolamento do estator conectado em Y. (c) Enrolamento do estator conectado em delta.

Campo magnético girante

Os enrolamentos trifásicos localizados no estator representados por aa' , bb' e cc' estão deslocados de 120 graus entre si. Quando uma corrente alternada senoidal circula por um enrolamento ela produz uma força magneto motriz também senoidal e centrada no eixo do enrolamento. Cada força magneto motriz pode ser representada por um vetor com magnitude proporcional ao valor instantâneo da corrente. As correntes instantâneas em cada enrolamento são mostradas na Figura 40.

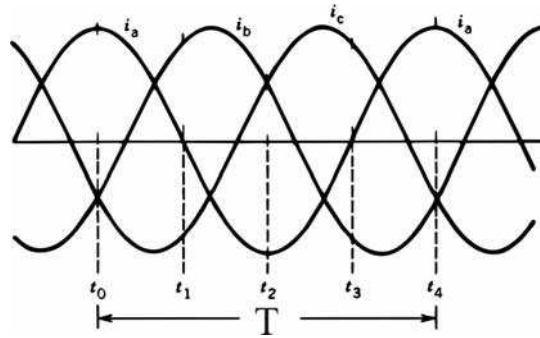


Figura 40 – Correntes instantâneas em cada enrolamento.

A força magneto motriz resultante é a composição vetorial das três componentes de força magneto motriz, que pode ser computada graficamente através da Figura 41. No instante de tempo t_0 , a corrente na fase a passa por um máximo positivo e as correntes nas fases b e c por metade da amplitude máxima negativa. Devido ao fato da corrente na fase a estar em um instante de máximo, a força magneto motriz produzida por este enrolamento é máxima. A força magneto motriz resultante da composição vetorial das forças magneto motriz devido aos três enrolamentos é dada pela equação (19). Além do mais, a força magneto motriz resultante é distribuída senoidalmente ao longo do entreferro. Analisando o que acontece à medida que as correntes em cada enrolamento variam senoidalmente, nota-se que o vetor resultante $\vec{F}$ possui a mesma amplitude em todos os instantes de tempo, mas ele gira em sentido anti-horário.

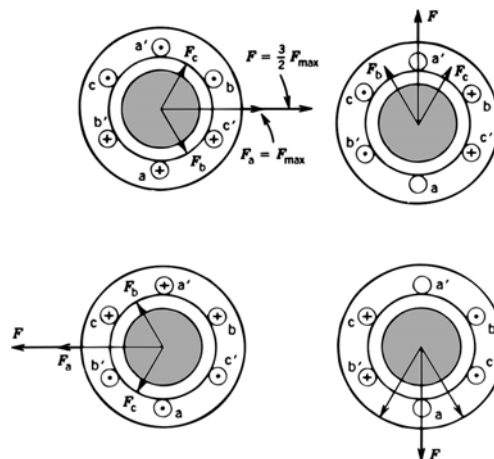


Figura 41 – Campo magnético girante.

$$\vec{F} = \frac{3}{2} \cdot F_{\max} \quad (19)$$

Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento para a máquina assíncrona pode ser ilustrado utilizando um ímã permanente e um disco livre para girar, como mostrado na Figura 42. O ímã permanente é suspenso sobre um disco metálico, preso por um pino em um mancal de ferro. O fluxo magnético produzido pelo ímã permanente flui através do circuito magnético série composto pelo ímã permanente, os entreferros e a placa de ferro. Ao girar o ímã permanente, o disco que se encontra sob o ímã também gira. O disco acompanha o movimento de rotação do ímã permanente devido à circulação de correntes induzidas. Estas correntes são induzidas devido ao movimento relativo entre o disco e o ímã permanente. As correntes induzidas tendem a produzir, de acordo com a lei de Lenz, um pólo sul magnético no disco sob o pólo norte magnético girante do ímã permanente, assim como

um pólo norte magnético no disco sob o pólo sul magnético girante do imã permanente. Enquanto o imã continua seu movimento em relação ao disco, continuará a indução de correntes parasitas e pólos magnéticos com polaridades opostas. O disco, desta forma, gira no mesmo sentido que o imã permanente, mas deve girar a uma velocidade menor para que haja uma velocidade relativa entre o imã permanente e o disco metálico.

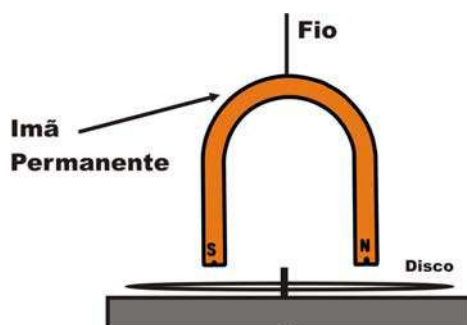


Figura 42– Ilustração para o princípio de funcionamento da máquina assíncrona.

Tensões induzidas

Foi dito na seção anterior que, quando correntes balanceadas circulam pelos enrolamentos trifásicos do estator, um campo magnético senoidal distribuído gira no entreferro da máquina. O efeito produzido por este campo magnético girante é similar ao produzido por um par de pólos girando no entreferro, de tal forma que a distribuição de densidade de fluxo ao longo deste entreferro seja senoidal com o pico ao longo do eixo dos pólos magnéticos. Esta situação é ilustrada através da Figura 43. O campo magnético girante induz tensões nas fases do estator. As expressões para as tensões induzidas podem ser obtidas utilizando a lei da indução de Faraday.

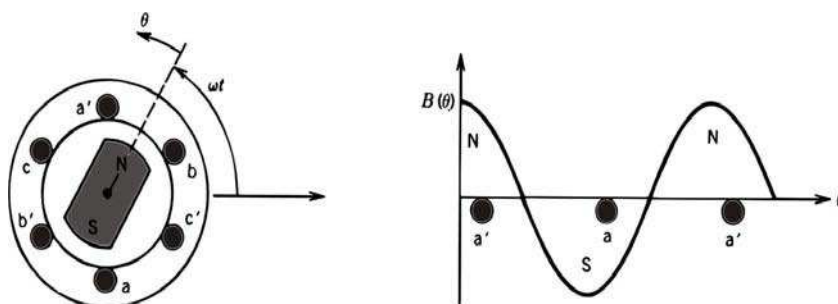


Figura 43 – Distribuição de densidade de fluxo ao longo do entreferro.

A equação (20) expressa a densidade de fluxo ao longo do entreferro. Utilizando a lei da indução de Faraday, a força eletromotriz, que é dada pela variação do fluxo no tempo multiplicada pelo número de espiras, permite escrever a expressão (21). A equação (22) permite calcular a tensão eficaz por fase. O fator de enrolamento K_w varia de 0,85 a 0,95 para a maioria das máquinas elétricas.

$$B(\theta) = B_{\max} \cdot \cos \theta \quad (20)$$

$$e_a = \omega \cdot N \cdot \varphi_p \cdot \text{seno}(\omega t) = E_{\max} \cdot \text{seno}(\omega t) \quad (21)$$

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \varphi_p \cdot K_w \quad (22)$$

A tensão induzida no rotor quando este se encontra parado é dado pela equação (23). Note que nesta equação a frequência é a mesma da fonte de alimentação, uma vez que esta é a frequência

da corrente induzida no circuito do rotor. Quando o rotor está em movimento, a tensão induzida no rotor é dada pela equação (24), onde s é o escorregamento da máquina.

$$E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \varphi_p \cdot K_w \quad (23)$$

$$E_{2s} = s \cdot E_2 \quad (24)$$

Escorregamento

Se o enrolamento do estator for conectado a uma fonte de alimentação trifásica e o circuito do rotor é fechado, as correntes induzidas no rotor irão produzir um campo magnético que irá interagir com o campo magnético girante no entreferro, dando origem a um torque. O rotor, se livre, irá iniciar o movimento de rotação. De acordo com a lei de Lenz, o rotor gira na direção do campo magnético girante de tal maneira que a velocidade relativa entre o campo magnético girante e o enrolamento do rotor diminua. O rotor irá atingir uma velocidade de rotação n que é inferior à velocidade de rotação síncrona n_s . É óbvio que a velocidade do rotor n não pode ser igual à velocidade síncrona, pois assim nenhuma corrente seria induzida no enrolamento do rotor e consequentemente nenhum torque seria produzido. A diferença entre a velocidade síncrona do campo magnético girante e a velocidade do rotor é denominada escorregamento e é definida através da equação (25).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (25)$$

Reorganizando a equação (25), pode-se explicitar a velocidade do motor n , como mostra a equação (26).

$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad (26)$$

A frequência da corrente induzida no circuito do rotor é dada pela equação (27).

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (27)$$

Exemplo: Um motor de indução trifásico, 460V, 100cv, 60Hz, 4 pólos funcionando a plena carga com escorregamento $s=0,05$. Determine:

A velocidade síncrona e a velocidade do motor.

A velocidade do campo magnético girante.

Circuito equivalente

O circuito equivalente pode ser utilizado para estudar e antecipar o desempenho da máquina de indução trifásica com apreciável proximidade do seu comportamento real. O circuito equivalente mostrado na Figura 44 considera as perdas por condução por fase no enrolamento de estator através da resistência R_1 , o fluxo de dispersão por fase no enrolamento de estator através da reatância X_1 , as perdas no núcleo através da resistência R_c , a energia necessária para magnetização do núcleo através da reatância X_m , o fluxo de dispersão no rotor refletido ao estator através da reatância X_2' e a resistência de condução do enrolamento do rotor refletido ao estator. Para se determinar os parâmetros do circuito elétrico equivalente podem-se utilizar os ensaios sem carga e com rotor bloqueado.

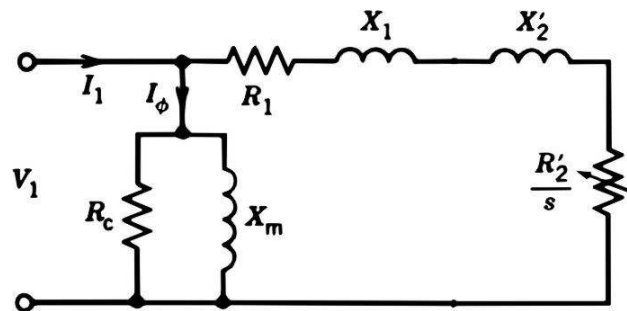


Figura 44 – Circuito elétrico equivalente para a máquina de indução.

Conjugado desenvolvido pelo motor

O conjugado desenvolvido pelo motor é resultado da interação mútua entre dois campos magnéticos. O conjugado ou torque desenvolvido quando o motor está parado é dado pela equação (28).

$$T = K_t \cdot (V_L)^2 \quad (28)$$

Onde:

K_t – É uma constante de torque para o número de pólos, o enrolamento, etc.

V_L – Tensão de linha no enrolamento do estator.

Características de desempenho

O circuito elétrico equivalente apresentado anteriormente pode ser utilizado para antecipar as características de desempenho para a máquina assíncrona. A Figura 45 mostra as curvas de conjugados em função da velocidade de rotação do motor, para as diferentes categorias. Estas categorias são definidas pela norma NBR 7094.

Categoria N

Os motores pertencentes a esta categoria são caracterizados por possuírem um conjugado de partida normal, corrente de partida normal e pequeno valor de escorregamento em regime permanente. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, com baixo conjugado de partida como bombas e máquinas operatrizes.

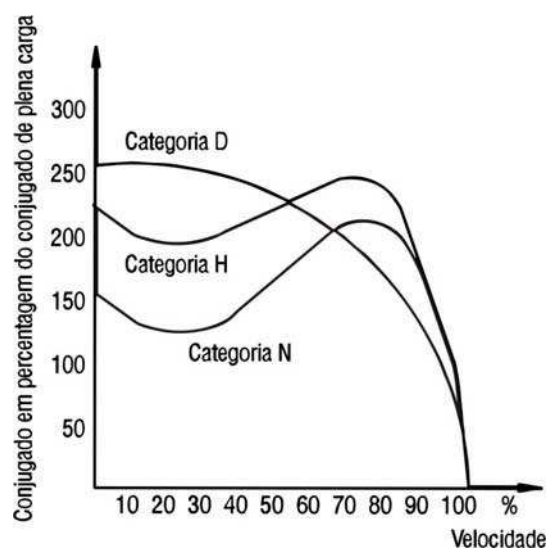


Figura 45– Curvas conjugados x velocidade para as categorias N, H e D.

Categoria H

Os motores que se enquadram nessa categoria são caracterizados por possuírem um conjugado de partida elevado, corrente de partida normal e baixo valor para o escorregamento em regime permanente. Esta categoria de motores é utilizada para acionamento de cargas que exigem maior conjugado de partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas com alta inércia, etc.

Categoria D

São motores caracterizados por conjugado de partida elevado, corrente de partida normal e alto escorregamento. Utilizados para acionamento de cargas como prensas excêntricas e máquinas semelhantes, em que a carga apresenta picos periódicos e cargas que necessitam de conjugado de partida elevado e corrente de partida limitada.

Controle de velocidade

Um motor de indução trifásico é essencialmente um motor de velocidade constante quando conectado a uma fonte de tensão constante e frequência fixa. A velocidade em regime permanente é muito próxima da velocidade síncrona. Entretanto, quando o torque solicitado aumenta, a velocidade diminui. A Figura 46 mostra um gráfico onde se tem uma carga solicitando um torque elevado e outra que solicita um torque moderado. Pode-se observar que para a carga que solicita um torque elevado, no ponto de operação, o motor possui menor velocidade. Portanto, a velocidade do motor é dada pela intersecção entre a curva de conjugado para o motor e a curva de carga.

Em muitas aplicações industriais, velocidades variáveis ou continuamente ajustáveis são necessárias. Tradicionalmente, motores de corrente contínua sempre foram utilizados em aplicações onde era necessária variação de velocidade. Entretanto, motores de corrente contínua são caros, requerem manutenção das escovas e dos comutadores e são proibitivos em ambientes agressivos. Em contrapartida, motores de indução são baratos, não requerem manutenção, estão aptos a funcionar em ambientes agressivos e estão disponíveis para velocidades elevadas. Com o advento da tecnologia de conversores estáticos, os inversores de frequência permitiram a disseminação dos motores de indução trifásicos em aplicações onde o controle de velocidade se faz necessário. A Figura 47 exemplifica o método de controle da velocidade do motor utilizando um inversor de frequência.

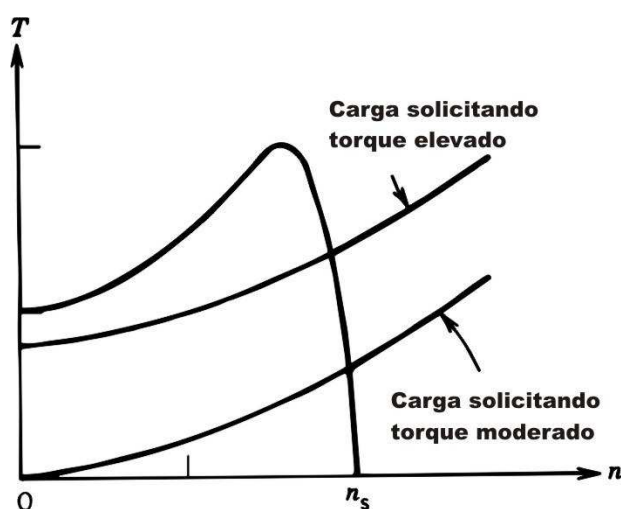


Figura 46– Solicitação de torque durante a partida e em regime permanente.



Figura 47– Controle de velocidade através da variação da frequência.

Métodos de partida dos motores de indução

Os motores com rotor tipo gaiola de esquilo são frequentemente conectados diretamente à rede de alimentação. Uma corrente de partida entre 5 e 8 vezes maior que a corrente nominal pode circular pelo motor. Esta corrente elevada ocorre com ou sem carga aplicada ao eixo. A diferença reside no fato de que com carga aplicada ao eixo o tempo que o motor fica submetido à corrente de partida é maior. Além de causar uma queda de tensão apreciável na rede de alimentação, pode afetar outras cargas conectadas à rede de alimentação. Além disso, se uma corrente elevada circular no motor por um longo intervalo de tempo, poderá aquecê-lo, danificando o isolamento do enrolamento. Nestes casos, costuma-se utilizar uma tensão reduzida durante a partida do motor para reduzir os efeitos da partida de motores assíncronos de grande porte.

No instante da partida, a corrente do rotor (e, portanto, a corrente do estator) é determinada pela equação (29). Através desta equação, verifica-se que na partida, quando o escorregamento é unitário, a corrente é elevada devido ao reduzido valor para a impedância do rotor. Na velocidade nominal, quando o escorregamento é aproximadamente nulo, a impedância é maior e consequentemente a corrente é menor.

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left[\frac{R_2}{s}\right]^2 + [X_2]^2}} \quad (29)$$

Onde:

I_2 =Corrente no rotor

E_2 =Tensão induzida no rotor quando o rotor está bloqueado.

R_2 =Resistência do rotor.

X_2 =Reatância do rotor bloqueado.

Um autotransformador abaixador pode ser utilizado para reduzir a tensão durante a partida, como mostra a Figura 48. Após atingir a velocidade nominal, o motor é alimentado com tensão nominal.

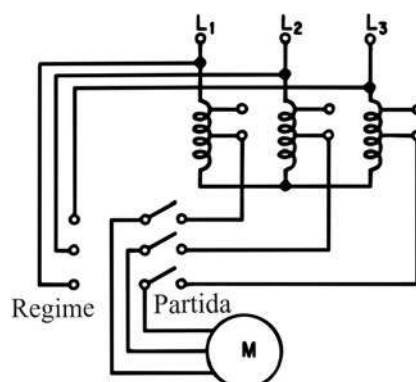


Figura 48– Método de partida utilizando autotransformador.

Outro método utilizado para reduzir a corrente de partida é através da conexão dos enrolamentos em estrela durante a partida do motor. Após atingir 90% da velocidade nominal do motor, desfaz-se a conexão estrela e estabelece-se a configuração em triângulo que é a conexão normal de operação para o motor. A Figura 49 mostra este método de partida para a máquina de indução trifásica. Devido à redução no conjugado de partida, o método de partida estrela-triângulo é recomendado para motores que acionam cargas com baixa inércia ou quando o motor parte sem carga aplicada ao eixo.

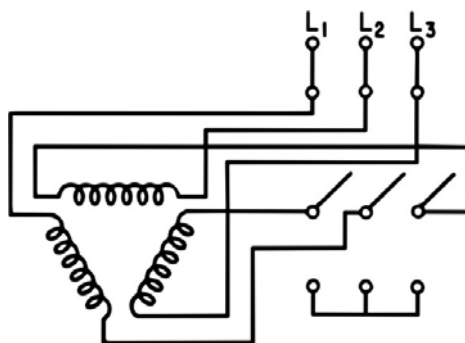


Figura 49– Método de partida utilizando a conexão estrela-triângulo.

Um conversor de estado sólido pode ser utilizado para reduzir a tensão durante a partida do motor de indução trifásico. Essa configuração, além de suavizar a partida do motor, é capaz de controlar a velocidade do motor em regime permanente. A Figura 50 apresenta um diagrama esquemático quando o conversor atua diretamente na tensão de alimentação do motor. O conversor de estado sólido mais utilizado para esta finalidade é o “soft-starter”, que traduzindo para o português, significa partida suave. Esta chave eletrônica permite um controle da corrente de partida e da corrente de parada do motor através do controle do ângulo de disparo dos tiristores no circuito de potência. Após a partida do motor os tiristores são desligados e o motor passa a ser alimentado diretamente a partir da rede de alimentação. O inversor de frequência pode ser utilizado como chave de partida eletrônica quando a aplicação requer redução da corrente de partida e também controle de velocidade e/ou torque.

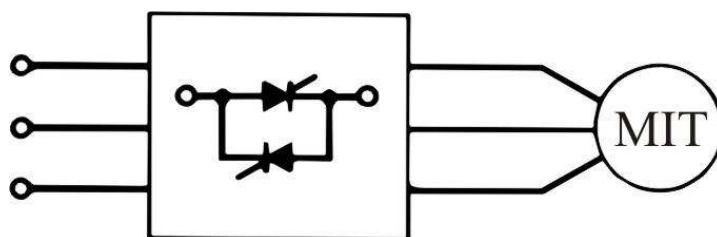


Figura 50– Método de partida utilizando um conversor estático.

É importante ressaltar que embora tensões menores reduzam a corrente durante a partida dos motores, o torque de partida decresce porque o torque é proporcional ao quadrado da tensão aplicada.

Frequentemente, motores de indução trifásicos tipo gaiola são projetados com enrolamentos de fase dividida, isto é, dois enrolamentos idênticos por fase cada um dos quais produzirá o mesmo número de pólos e o mesmo campo girante. A vantagem é que eles podem ser ligados em série para sistemas de alta tensão ou em paralelo para sistemas de baixa tensão. A Figura 51 mostra um motor com enrolamentos de fase dividida. Na partida somente uma seção estrela é empregada. Com isso e impedância é maior, e a corrente de partida é aproximadamente igual a 65% da corrente de partida

normal. O motor parte, assim, com metade de seu enrolamento ligado em estrela, e quando atinge velocidade, o segundo enrolamento é ligado em paralelo. Devido ao decréscimo no conjugado durante a partida, os fabricantes recomendam que a partida por fase dividida seja utilizada apenas quando o motor parte com carga muito pequena ou sem carga nenhuma, como no caso de ventiladores ou furadeiras.

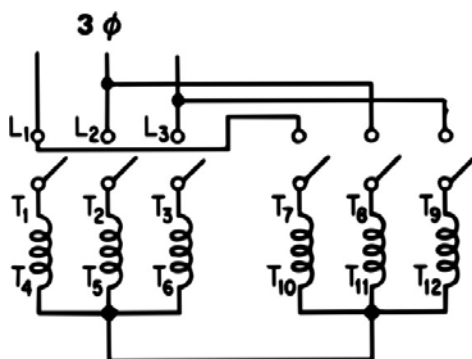


Figura 51– Partida de motor de indução com fase dividida.

Influência da rede elétrica na operação do MIT

A operação eficiente dos motores de indução trifásicos depende, dentre outras coisas, da qualidade da rede elétrica de alimentação. O ideal é que esta rede seja equilibrada e com suas tensões apresentando amplitude e frequência constantes.

Entre as causas do desequilíbrio de um sistema trifásico, a principal é a ligação desproporcional de cargas monofásicas, tais como, sistemas de iluminação e motores monofásicos, nas suas três fases.

O desequilíbrio das tensões provoca vários problemas:

1. Desperdício de energia devido à elevação das perdas, provocadas por altas correntes desequilibradas.
2. Elevação da temperatura acima dos níveis aceitáveis pelo motor.
3. Redução do torque disponível para a carga, pela existência de componentes de campo magnético girante em sentido contrário ao da rotação do motor.
4. Pequena redução do fator de potência.

Estudos já demonstraram que um pequeno desequilíbrio de 3,5% na tensão pode aumentar as perdas do motor em 20%. Um desequilíbrio de 5% ou mais pode destruí-lo rapidamente.

A eficiência e o fator de potência dos motores de indução trifásicos variam segundo o valor da tensão de alimentação. Estes motores são projetados para suportarem variações de $\pm 10\%$ da tensão nominal.

Os motores podem suportar variações de frequência de -5% até +3%. Uma variação simultânea da amplitude e da frequência pode ser prejudicial para o motor.

Uma tensão de alimentação abaixo do valor nominal do motor provoca aumento da corrente. Este aumento é devido à necessidade em continuar fornecendo a potência solicitada pela carga, com uma tensão de alimentação reduzida. Este aumento na corrente implica em elevação da temperatura e ainda redução dos torques de partida e de regime. Por outro lado, um valor de tensão acima do nominal acarreta redução do fator de potência e aumento da corrente de partida.

Sendo o torque dos motores de indução trifásicos proporcional ao quadrado da tensão, motores alimentados com tensão abaixo do valor nominal apresentam dificuldades para partir ou acionar cargas de alta inércia. Por exemplo, se a tensão de alimentação for 80% do valor nominal, o

torque de partida disponível é somente 64% do seu valor original. Resumindo, a alimentação com tensão acima ou abaixo da nominal influencia significativamente o comportamento dos motores de indução trifásicos.

É possível alimentar um motor projetado para uma frequência igual a 50 Hz com uma fonte de alimentação cuja frequência seja igual a 60 Hz. Entretanto, a potência nominal, a corrente nominal, a corrente de partida e as relações entre o conjugado de partida e o conjugado nominal e o conjugado máximo e o nominal diminuem. A velocidade aumenta em torno de 20%. O contrário, alimentar um motor projetado para uma frequência igual a 60 Hz com uma fonte de alimentação cuja frequência seja igual a 50 Hz implica em redução na velocidade, o que resulta em redução na ventilação. Além disso, ocorre uma redução na reatância indutiva e na força contra eletromotriz o que implica aumento na corrente do motor. O aumento na corrente e a redução na ventilação provocam aumento de temperatura. Por este motivo, esta situação não é aconselhável.

Influência da carga mecânica na operação do MIT

Se o motor de indução trifásico não apresenta características compatíveis com a carga, possuindo uma potência muito acima ou inferior à necessária, também neste caso o motor não apresentará um bom comportamento elétrico, mecânico ou térmico.

Uma das causas mais comuns de operação ineficiente dos motores elétricos é o motor dimensionado com uma potência muito superior à necessária. Um motor dimensionado com uma potência muito superior à necessária implica em conseqüências:

- Maior custo, volume e peso do motor.

- Redução do fator de potência.

- Redução da eficiência, embora muitos motores apresentem sua eficiência máxima a, aproximadamente, 75% da sua carga nominal.

- Maior corrente de partida, acarretando maior custo da instalação e proteção.

Estudos realizados pelo PROCEL/CEMIG/EFEI mostraram que nem sempre o motor dimensionado com uma potência muito superior à necessária corresponde a maiores perdas de energia. Cada caso deve ser analisado. Em geral, para cargas entre 75 e 100% da nominal, o motor pode ser considerado estando bem dimensionado.

O motor dimensionado com uma potência muito inferior à necessária apresenta sobre aquecimento, acarretando redução da vida útil do motor. Entretanto, esta situação é, geralmente, prontamente percebida e, conseqüentemente corrigida.

Fator de serviço

A norma ABNT NBR 7094/1996, define fator de serviço como um multiplicador que, quando aplicado à potência nominal do motor, indica a carga que pode ser acionada continuamente sob tensão e frequência nominais. Entretanto, a utilização do fator de serviço implica em vida útil inferior àquela do motor com carga nominal.

Influência do ambiente na operação do MIT

As condições ambientais onde está instalado o motor têm influência na sua operação. Poeiras que se depositam na sua carcaça, ao absorverem umidade ou partículas de óleo, formam uma crosta que dificulta a liberação do calor. Por causa disso, a temperatura interna do motor se eleva. Uma das conseqüências é aumentar o valor para a resistência do enrolamento e diminuir a eficiência do motor.

Áreas de processamento de cereais e de siderurgia são exemplos de ambientes que requerem cuidados com a refrigeração dos motores, devido à presença de pós, poeiras, partículas em suspensão, etc.

A elevação de temperatura pela presença de sujeira na carcaça acaba provocando também a deterioração do lubrificante, óleo ou graxa, utilizado no mancal ou rolamento, pois a sua capacidade de lubrificação diminui com o aumento da temperatura.

A umidade é uma das principais causas de falhas na isolação dos motores. Em ambientes úmidos ocorrem problemas de corrosão e deterioração do isolamento, já que a umidade facilita o depósito e a absorção de poeiras e produtos químicos.

Comprovadamente, motores que operam em ambientes úmidos apresentam mais falhas no seu sistema de isolação do que aqueles que trabalham em ambientes secos sujeitos ao mesmo tipo de sujeiras, pós e agentes químicos.

Motores que trabalham em ambientes desfavoráveis ou mesmo agressivos devem ser providos de um grau de proteção. A norma brasileira NBR 6146 define os vários graus de proteção para os motores elétricos, por meio das letras características IP, seguida por dois algarismos. As tabelas abaixo apresentam os critérios de proteção.

Grau de proteção contra penetração de corpos sólidos

1o Algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos acima de 50mm.
2	Corpos estranhos acima de 12mm.
3	Corpos estranhos acima de 2,5mm.
4	Corpos estranhos acima de 1,0mm.
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor.
6	Totalmente protegido contra poeira.

Grau de proteção contra penetração de água

2o Algarismo	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção.
1	Pingos de água na vertical.
2	Pingos de água até a inclinação de 15º com a vertical.
3	Pingos de água até a inclinação de 60º com a vertical.
4	Respingos em todas as direções.
5	Jatos de água em todas as direções.
6	Água de vagalhões.
7	Imersão temporária.
8	Imersão permanente.

Para motores que são instalados ao tempo, a norma prevê uma designação com a letra W entre as letras IP e os algarismos. Assim, um motor que irá trabalhar em ambiente aberto e poeirento deve ter grau de proteção IPW55.

As perdas que os motores elétricos apresentam provocam elevação de temperatura em suas diversas partes construtivas. Desta forma, os enrolamentos dos motores são isolados com materiais conhecidos como materiais isolantes, que suportam temperaturas elevadas.

A isolação tem influência na eficiência do motor. Em geral, maior será a eficiência se mais fina for a camada de isolante utilizada.

Os materiais isolantes definem a classe de isolação do motor, as quais correspondem à temperatura máxima que cada material pode suportar sem apresentar alterações nas suas características isolantes.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme a norma NBR 7094 são os seguintes:

Classe A – 105oC

Classe E – 120oC

Classe B – 130oC

Classe F – 155oC

Classe H – 180oC

As classes B e F são as comumente utilizadas em motores normais. Na classe B são empregados materiais a base de poliéster e poli-imídicos aglutinados ou impregnados com materiais orgânicos. Já na classe F o isolante é composto por materiais a base de mica, amianto e fibra de vidro, aglutinados com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliésteres ou epóxi.

Não é justificável avaliar-se a temperatura dos enrolamentos simplesmente sentindo-se a temperatura externa do motor com o auxílio das mãos. Uma carcaça fria necessariamente não está à mesma temperatura que os enrolamentos do motor. Um exemplo típico é no caso da partida, onde as perdas provocam um maior aquecimento dos enrolamentos, enquanto na carcaça a temperatura permanece inalterada.

A vida de um motor praticamente termina quando o isolamento dos enrolamentos se deteriora, tornando-se ressecado e quebradiço. Isso se dá, em média, em torno de 20 anos.

O motor de alto rendimento

As inúmeras vantagens que o motor de indução de gaiola apresenta, o torna o mais importante equipamento de uso final da energia elétrica. No Brasil, a quantidade de energia que ele processa é superior a 1/3 de toda a energia elétrica consumida. Diante do exposto, qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar a eficiência deste equipamento trará grande economia ao país.

A Figura 52 mostra uma comparação, segundo a norma americana NEMA, entre a eficiência de motores de alto rendimento e motores padrão.

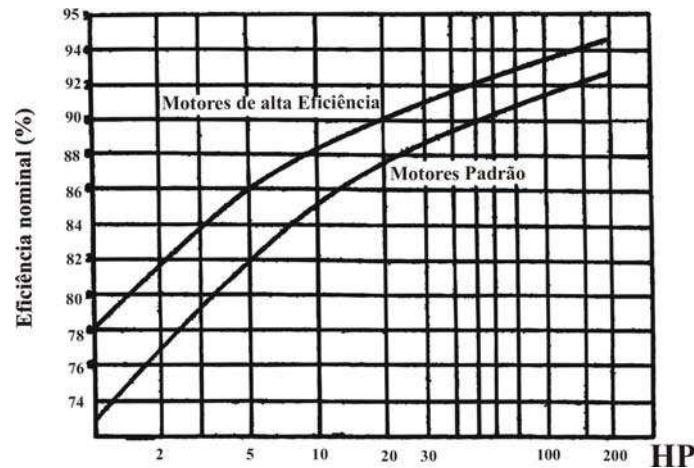


Figura 52– Eficiência nominal para motores padrão e de alto rendimento.

Evidentemente que a redução das perdas, com o conseqüente aumento da eficiência, implica em aumento dos custos de material e de fabricação. Assim, motores de alto rendimento possuem custo de aquisição inicial maior que os motores padrão. Entretanto, sua utilização pode trazer grande economia em curto prazo.

Os motores de alto rendimento têm o seu projeto modificado, em relação aos motores da linha padrão, objetivando a diminuição da sua perda global.

Como todo equipamento, os motores de alto rendimento apresentam benefícios na sua utilização. A tabela abaixo apresenta as principais vantagens e também as desvantagens, quando comparados com os motores padrão.

Vantagens	Desvantagens
Economizam no consumo de energia elétrica.	Custo inicial mais elevado.
A maioria apresenta um fator de potência maior.	Pesam mais e ocupam mais volume.
Mesmo com carga abaixo da nominal, apresentam eficiência maior e mais constante.	A economia só é considerável quando o fator de carga é elevado.

Especificação de motores elétricos

Quando se deseja escolher um motor elétrico para acionar uma determinada carga, é necessário conhecer o conjugado requerido pela carga e a rotação que esta carga solicita em condições normais. A potência nominal do motor é dada pela equação (30).

$$P_{motor} = 2 \cdot \pi \cdot n_{motor} \cdot C_{motor} \quad (30)$$

Se o acoplamento for com redução de velocidade, deve-se levar em consideração a relação entre as velocidades e o rendimento do acoplamento. O rendimento do acoplamento é a relação entre a potência transmitida à carga e a potência do motor. A equação (31) expressa matematicamente o que foi dito.

$$\eta_{ac} = \frac{P_{carga}}{P_{motor}} \quad (31)$$

A tabela abaixo fornece a faixa de rendimento para diferentes tipos de acoplamentos.

Acoplamento	Rendimento (%)
Acoplamento direto	100
Polia com correia em V	97-99

Polia com correia plana	95-98
Correia dentada	97-98
Engrenagem	96-99
Cardã	25-100

O critério básico para especificação de um motor para acionamento de uma determinada carga é que o conjugado do motor seja superior ao conjugado da carga, em toda a faixa de velocidade. Além disso, é necessário que o tempo de aceleração do motor seja menor que 80% do tempo de rotor bloqueado. Este critério visa proteger o isolamento da máquina. O tempo de aceleração é calculado através da equação (32).

$$t_a = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \left(\frac{J_m + J_e}{C_{mmed} - C_{rmed}} \right) \quad (32)$$

J_m – Inércia do motor.

J_e – Inércia da carga referida ao eixo do motor.

C_{mmed} – Conjugado médio do motor.

C_{rmed} – Conjugado resistente médio referido ao eixo do motor.

O conjugado resistente médio é igual ao conjugado de carga de carga médio multiplicado pela relação entre a velocidade da carga e a velocidade do motor. As equações (33) e (34) expressam a relação de transmissão e o conjugado resistente médio, respectivamente.

$$R = \frac{n_{carga}}{n_{motor}} \quad (33)$$

$$C_{rmed} = R \cdot C_{cmed} \quad (34)$$

O conjugado de carga médio depende do tipo de carga que o motor deve acionar. Uma carga com conjugado linear, como por exemplo, uma bomba de vácuo, possui conjugado de carga médio dado pela equação (35). Uma bomba centrífuga, um ventilador, um misturador centrífugo e um compressor centrífugo possuem conjugado de carga médio parabólico dado pela equação (36).

$$C_{cmed} = \frac{C_o + C_{cn}}{2} \quad (35)$$

$$C_{cmed} = \frac{2 \cdot C_o + C_{cn}}{3} \quad (36)$$

O momento de inércia da carga referida ao eixo do motor é igual ao momento de inércia da carga multiplicado pela relação de transmissão ao quadrado. A equação (37) expressa o momento de inércia da carga referido ao eixo do motor.

$$J_e = J_{carga} \cdot R^2 \quad (37)$$

O conjugado do motor médio para as categorias N e H é dado pela equação (38), onde C_p/C_n e C_{max}/C_n são dados fornecidos pelos fabricantes dos motores de indução trifásicos. Estes dados constam nos manuais destes motores. O conjugado nominal C_n também consta nos manuais dos motores.

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot \left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{max}}{C_n} \right) \cdot C_n \cdot 9,81 \quad (38)$$

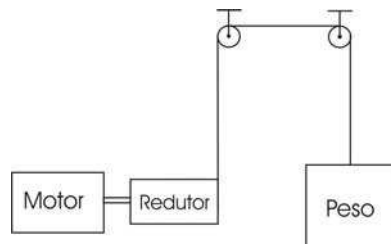
Para iniciar o processo de escolha do motor adequado é necessário conhecer a rotação e a potência necessária. De acordo com o tipo de carga a ser acionada determina-se a potência do motor utilizando uma equação específica. Para especificar um motor para uma talha utiliza-se a equação (39) que relaciona o peso da carga e a velocidade de içamento, levando-se em consideração o rendimento da talha. Para especificar um motor para acionar uma bomba centrífuga utiliza-se a equação (40) que relaciona a massa específica, a altura manométrica e a vazão da bomba, levando em consideração o rendimento da bomba. Em aplicações com conjugado constante e nas quais se conhece a velocidade angular é possível determinar a potência utilizando a equação (41).

$$P = \frac{m \cdot g \cdot v}{\eta_{talha}} \quad (39)$$

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_{bomba}} \quad (40)$$

$$P = C \cdot \omega_m \quad (41)$$

Exemplo: Considere o sistema abaixo utilizado para levantamento de um determinado peso com capacidade para levantamento de 50kg, com uma velocidade de içamento igual a 0,5m/s. Se o raio da polia é igual a 90mm, a redução de 1:32, o rendimento da talha é igual a 97%, a inércia das partes girantes é igual a 0,0005Kgm². Especifique o motor capaz de realizar este trabalho.



A potência necessária para levantar o peso é calculada em função do peso e da velocidade de içamento.

O conjugado requerido pela carga é calculado para a potência de 252W e velocidade de içamento de 0,5m/s.

$$C_c = \frac{P_c}{\omega} = \frac{P_c}{\frac{v}{R_{polia}}} = \frac{252}{\frac{0,5}{0,09}} = 45,36 N \cdot m$$

A velocidade de rotação do motor é determinada utilizando a velocidade de içamento, o raio da polia e a redução de 1:32.

$$n_{motor} = \frac{n_{carga}}{R} = \frac{\frac{0,5}{2\pi \cdot 0,09}}{\frac{1}{32}} = 28,3 rps = 1699 rpm$$

O motor escolhido para executar esta tarefa foi o abaixo descrito. Estes dados foram extraídos do catálogo geral de motores de um determinado fabricante.

Tipo do motor	Motor de alto rendimento plus
Potência	0,5 CV
Número de pólos	4 pólos
Rotação	1720 rpm
Conjugado nominal (Cn)	0,21 Kgfm
Cp/Cn	2,7

Cmax/Cn	3
J	0,00079
Tempo de rotor bloqueado	10 s
In	2,07 A

Cálculo das inércias

$$J_{massa_e} = 50 \cdot 0,09^2 \cdot \left(\frac{1}{32}\right)^2 = 0,395 \cdot 10^{-3} \text{ Kgm}^2$$

$$J_{PG_e} = 0,0005 \cdot \left(\frac{1}{32}\right)^2 = 4,88 \cdot 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

$$J_e = J_{massa_e} + J_{PG_e} = 0,395 \cdot 10^{-3} \text{ Kgm}^2$$

O conjugado resistente médio é calculado referindo-o ao eixo do motor. O conjugado do motor médio é calculado utilizando a equação (34).

$$C_{rmed} = \frac{1}{32} \cdot 45,36 = 1,42 \text{ Nm}$$

$$C_{mmed} = 0,45 \cdot (2,7 + 3) \cdot 0,21 \cdot 9,81 = 5,28 \text{ Nm}$$

Enfim, calcula-se o tempo de aceleração que deve ser menor que 80% do tempo de rotor bloqueado.

$$t_a = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1720}{60} \cdot \left(\frac{0,00079 + 0,395 \cdot 10^{-3}}{5,28 - 1,42} \right) = 55 \text{ ms}$$

Como o tempo de rotor bloqueado é muito maior que o tempo de aceleração, o motor especificado atende.

6.2 EXERCÍCIOS MIT

- 1) Considere um motor de indução trifásico de 5cv, 208V, 60Hz, funcionando a 1746 rpm e fornecendo potência nominal a carga. Determine o número de pólos da máquina, o escorregamento e a frequência da corrente no rotor.
- 2) Um motor de indução trifásico, 460V, 100cv, 60Hz, 6 pólos funciona com um escorregamento igual a 3%. Determine a velocidade de rotação do motor, a frequência da corrente no rotor e a velocidade do campo girante.
- 3) Sabendo que o conjugado nominal do motor é dado pela relação entre a velocidade da carga e a velocidade nominal do motor, multiplicada pelo conjugado da carga, e que a potência nominal do motor é dada pela equação abaixo, determine a potência que um motor de 4 pólos, 60Hz deve ter para acionar uma carga com conjugado de 4 Nm e rotação de 1200 rpm.

$$P_{motor} = \frac{2\pi \cdot n_{motor} \cdot C_{motor}}{60} (Watt)$$

- 4) Considere um motor 1CV. Se a tensão de alimentação é uma tensão trifásica de 380V e o fator de potência quando o fator de serviço de 1,15 está em plena utilização é igual a 80%, qual a corrente solicitada por este motor considerando o rendimento igual a 75%?
- 5) Qual a velocidade nominal de um motor de indução de 6 pólos cuja tensão de alimentação é 440V e 60Hz, cujo escorregamento é igual a 0,06?
- 6) Qual o rendimento de um motor de indução trifásico de 3cv, sabendo que a tensão de alimentação deste motor é igual a 380V e que a corrente solicitada da rede é igual a 4,3 ampères e fator de potência igual a 0,85?
- 7) Um motor trifásico 5CV, dois pólos, ligado em estrela, a plena carga com escorregamento de 8%, rendimento de 80% e fator de potência de 0,86 é alimentado pela rede elétrica de 220/380V-60Hz. Calcule:
A potência elétrica fornecida.
A corrente por fase. E o conjugado do motor
- 8) Qual a potência para um motor assíncrono de 4 pólos, alimentado com uma tensão 380V, 60Hz, que deverá acionar uma carga com conjugado igual a 4Nm, rotação 1200rpm e acoplamento com correia dentada cujo rendimento do acoplamento é igual a 97%?
- 9) Especificar um motor de indução de gaiola para acionar uma carga com conjugado constante com as seguintes características:
Alimentação 380V/60Hz
Pc=80kW
Cc=44kgfm
Jc=10,5kgm²
Acoplamento carda
Selecionar um motor de alto rendimento plus
- 10) Especificar um motor de indução de alto rendimento para acionar uma bomba centrífuga ($\eta_c = 44\%$) utilizada para o bombeamento de um fluido a uma altura manométrica de 24m. A massa específica do fluido é 1,5kg/m³ e a vazão da bomba é de 3,6m³/s a uma rotação de 3400 rpm. A inércia da bomba é de 7,8kgm². A alimentação é 380V, 60Hz. Considere a carga inicial igual a 20% da carga nominal.

Que motor deve ser empregado para acionar uma talha com as seguintes características:

Massa a ser levantada igual a 1100kg.

Raio da polia/tambor de 90mm

Velocidade de içamento de 0,5m/s

Redução de 1:31

Rendimento total do sistema igual a 97%

Inércia das partes girantes é de 0,00049kgm²

Classe de operação da talha é de 1 Dm(ED=15%; 80 manobras por hora)

7 MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

7.1 INTRODUÇÃO

Os motores de indução monofásicos são motores pequenos, projetados para potências fracionadas. A maioria desses motores é construída com potências menores que 1CV. Esses motores encontram aplicações em equipamentos domésticos, lojas, fábricas, etc. Uma residência média, nos Estados Unidos da América, utiliza uma dúzia ou mais de motores monofásicos. Esses motores possuem uma construção relativamente simples e são classificados de acordo com o método de partida utilizado, uma vez que são motores que não possuem conjugado de partida.

Características do motor de indução monofásico

O Motor de indução monofásico possui rotor com enrolamento tipo gaiola de esquilo e estator com enrolamento distribuído. A corrente que circula pelo enrolamento localizado no rotor é uma corrente induzida, em acordo com a lei da indução de Faraday. A Figura 53 mostra um diagrama esquemático para um motor de indução monofásico. Por não possuir torque de partida, se alimentado o enrolamento do estator, o rotor não iniciará o movimento de rotação. Entretanto, se for dada uma rotação inicial no rotor, com o auxílio da mão ou outro meio qualquer, o rotor continuará o movimento enquanto o enrolamento do estator permanecer alimentado.

A Figura 53 mostra a curva de torque em função da velocidade do rotor. Como pode ser observado, se a velocidade do rotor for nula, ou seja, se o rotor estiver parado, o torque líquido desenvolvido também será nulo. A explicação reside no fato de que com o rotor parado o torque positivo é igual, em magnitude, ao torque negativo. Assim, nenhum torque líquido é desenvolvido. Na velocidade síncrona o torque desenvolvido também é nulo. Uma vez iniciado o movimento de rotação, o motor de indução monofásico desenvolverá conjugado no mesmo sentido em que foi iniciado o movimento.



Figura 53 – Diagrama para o motor de indução monofásico.

A curva de torque em função da velocidade de rotação do rotor pode ser alterada através da inserção de alguns componentes auxiliares.

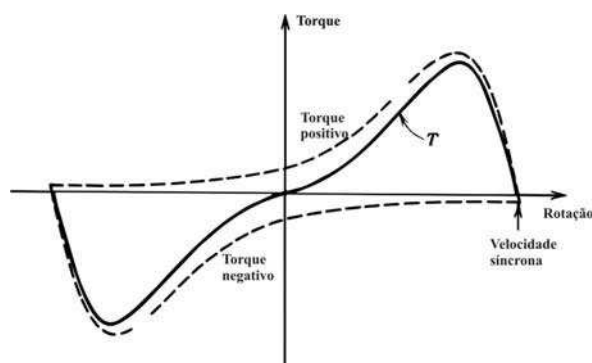


Figura 54– Curva de torque em função da velocidade do rotor.

Teoria do duplo campo magnético girante

Após a partida, o motor de indução monofásico desenvolve conjugado eletromagnético, o que pode ser explicado através da teoria do duplo campo magnético girante. Um campo pulsante é equivalente a dois campos magnéticos com metade da amplitude original, girando à mesma velocidade síncrona, porém em direções opostas. Considere dois vetores, f e b , de igual amplitude OP , f movendo-se em sentido anti-horário e b em sentido horário, como mostra a figura 90. O vetor resultante OR alterna em amplitude entre $2OP$ e $-2OP$, consistindo de um campo magnético pulsante, resultante do duplo campo magnético girante. Ambos os campos magnéticos girantes produzem conjugados, porém em sentidos opostos, como mostra a Figura 55. Assim, em qualquer velocidade diferente da nula e da síncrona, um conjugado líquido é produzido.

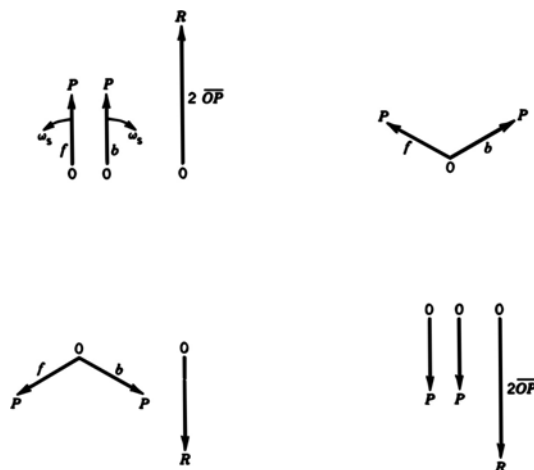


Figura 55– Campo magnético pulsante devido ao duplo campo magnético girante.

Escorregamento

Considerando que o rotor está girando com velocidade n , e que a velocidade síncrona é dada por n_s , o escorregamento é dado pela equação (42).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (42)$$

Tensão induzida no estator

A tensão induzida no estator é dada pela equação (43).

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad (43)$$

f - Frequência em Hz.

N – número de espiras.

Φ – fluxo no entreferro

Métodos de partida e classificação

Como explicado anteriormente, o motor de indução monofásico não produz torque líquido quando o rotor está parado. Para que o motor entre em funcionamento, é necessário utilizar algum artifício durante a partida. Os motores são classificados de acordo com o método de partida: motor com enrolamento auxiliar, motor com capacitor de partida, motor com capacitor de partida e enrolamento auxiliar permanente e motor com capacitor de partida e capacitor permanente. Após a partida, o motor produz torque líquido mesmo com apenas um enrolamento de estator. A seguir são apresentados de forma mais detalhada os diversos tipos de motores de indução monofásicos de acordo com o método utilizado para a partida.

Motor com enrolamento auxiliar

A Figura 56(a) apresenta o diagrama esquemático para o motor monofásico com enrolamento auxiliar. A Figura 56(b) mostra o diagrama fasorial para as correntes no enrolamento auxiliar e no enrolamento principal. A chave centrífuga encontra-se em série com o enrolamento auxiliar.

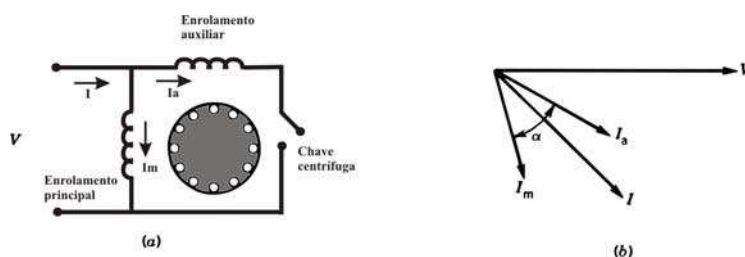


Figura 56– (a) Diagrama para o método de partida com enrolamento auxiliar. (b) Diagrama de Fasores.

Um enrolamento auxiliar com uma reatância maior que o enrolamento principal é inserido em paralelo com o enrolamento principal somente durante a partida do motor. Quando o rotor atinge 75% da velocidade síncrona, uma chave centrífuga retira o enrolamento auxiliar do circuito, permanecendo apenas o enrolamento principal. Antes que a chave centrífuga atue, as correntes no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar estão defasadas entre si de um ângulo α . O torque desenvolvido é proporcional à corrente no enrolamento principal, à corrente no enrolamento auxiliar e ao seno do ângulo de defasagem entre essas duas correntes. A equação (44) expressa esta proporcionalidade para o torque desenvolvido.

$$T \propto I_m \cdot I_a \cdot \sin \alpha \quad (44)$$

Para inverter o sentido de rotação é necessário inverter as ligações terminais no enrolamento auxiliar de partida em relação às do enrolamento principal de funcionamento. Ao contrário dos motores de indução trifásicos, a inversão do sentido de rotação nunca pode ser realizada em condições de funcionamento. A explicação reside no fato do torque bifásico ou de campo dividido ser menor que o torque devido à força eletromotriz de velocidade produzida pelo campo cruzado do rotor.

Motor com capacitor de partida

Um torque de partida maior pode ser obtido se um capacitor for introduzido em série com o enrolamento auxiliar, como mostra a Figura 57(a). Este aumento no torque é devido ao aumento no ângulo de defasagem entre as correntes. Um valor de capacitor típico para um motor de 1/2 hp é 300 μ F. Por ser inserido no circuito apenas durante a partida do motor, este capacitor pode ser um capacitor eletrolítico de baixo custo. A Figura 57(b) apresenta o diagrama fasorial para esta configuração.

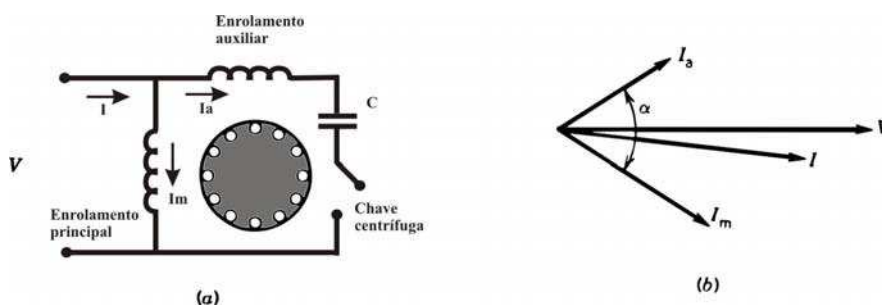


Figura 57– (a) Diagrama para o método de partida com capacitor de partida. (b) Diagrama de Fasores.

Ao contrário dos motores de indução com enrolamento de partida auxiliar, a inversão do sentido de rotação pode ser realizada em condições de funcionamento. A explicação reside no fato do torque bifásico ou de campo dividido ser maior que o torque devido à força eletromotriz de velocidade, estabelecendo-se um torque no sentido oposto ao de rotação.

Motor com capacitor e enrolamento auxiliar permanente

A Figura 58 mostra o diagrama esquemático e curva de torque em função da velocidade para a configuração em que tanto o enrolamento auxiliar quanto o capacitor são permanentes. Nesta configuração não se tem a chave centrífuga. Isto simplifica a construção do motor e reduz o custo de produção. O capacitor utilizado é da ordem de 20 a 50 μF . Devido ao fato deste funcionar continuamente, utiliza-se um capacitor de óleo para corrente alternada.

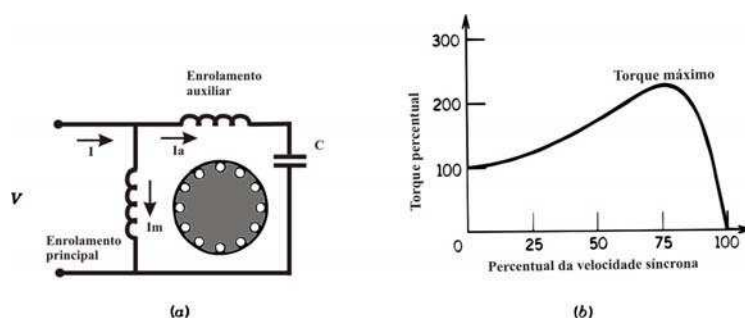


Figura 58– (a) Diagrama para o método de partida com enrolamento auxiliar e capacitor permanentes. (b) Gráfico torque percentual em função do percentual da velocidade síncrona.

Motor com capacitor de partida e capacitor permanente.

A Figura 59 ilustra o método de partida para o motor de indução monofásico em que se tem um capacitor permanente e um capacitor de partida. Este último é retirado do circuito com o auxílio de uma chave centrífuga. Teoricamente, um desempenho ótimo é obtido com essa configuração, tanto durante a partida quanto em regime permanente. O capacitor de partida é um capacitor grande e do tipo eletrolítico para corrente alternada. O capacitor permanente é um capacitor de óleo, pequeno e para corrente alternada. Esta configuração possui o melhor desempenho e o maior custo.

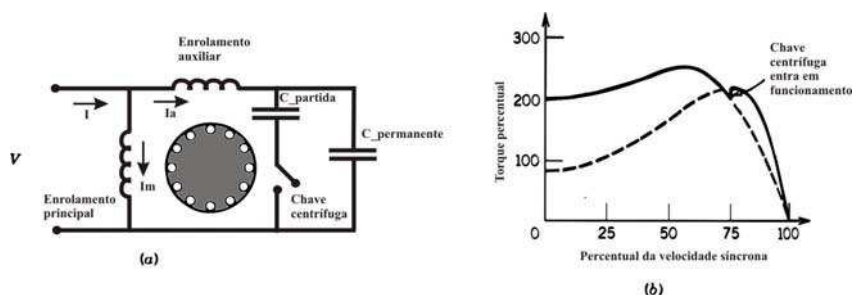


Figura 59- (a) Diagrama para o método de partida com capacitor de partida e capacitor permanente. (b) Gráfico torque percentual em função do percentual da velocidade síncrona.

Projeto do capacitor de partida

Considere um motor possuindo um enrolamento auxiliar e um capacitor permanente, conforme mostrado na Figura 60. O enrolamento principal e o enrolamento auxiliar, além da auto-indutância, possuem resistência elétrica. O capacitor pode ser calculado através da equação (45).

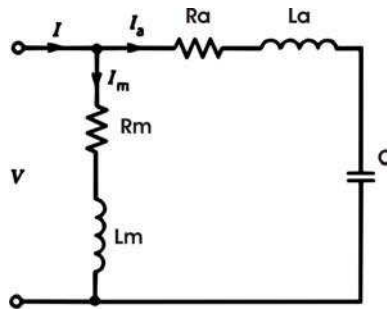


Figura 60– Motor de indução monofásico com capacitor permanente.

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f [2\pi \cdot f \cdot L_a + (\frac{R_a R_m}{\sqrt{R_m^2 + (2\pi \cdot f \cdot L_m)^2} + 2\pi \cdot f \cdot L_m)}]} \quad (45)$$

O capacitor calculado através da equação acima, quando conectado em série com a bobina auxiliar, produzirá um torque máximo durante a partida.

Exercícios

Motores de indução monofásicos

Um motor de indução monofásico de 0,25HP, 110V, de fase dividida, solicita por seu enrolamento auxiliar uma corrente de 4 A com ângulo de fase igual a 15o em atraso em relação à tensão da fonte, e, por seu enrolamento principal, uma corrente de 6 A com ângulo de fase igual a 40o. No instante da partida calcule a corrente total a rotor bloqueado e o fator de potência.

Acrescentando um capacitor ao enrolamento auxiliar do exercício anterior, provoca-se um ângulo de fase igual a 42o em avanço, relacionado à corrente no enrolamento auxiliar. Calcule a corrente total a rotor bloqueado e o fator de potência.

Considere um motor de indução monofásico com enrolamento auxiliar e capacitor de partida permanente. A impedância do enrolamento principal é igual a $2,2+j2,5 \Omega$. A impedância do enrolamento auxiliar é igual a $3,5+j2,5\Omega$. Se a fonte de alimentação possui uma frequência igual a 60Hz, calcule o capacitor necessário para a partida do motor.

Um motor de indução monofásico é alimentado a partir de um alternador síncrono. Este alternador é acionado por uma máquina primária a 3000rpm, com 2 pólos, possui 1500 espiras por fase e o fluxo por pólo é igual a 1mWb. Considerando o fator de enrolamento igual a 1, e o motor monofásico sendo alimentado por duas fases do alternador, determine a corrente fornecida ao motor se este é um motor de ½ HP.

8 SERVOMOTOR

8.1 INTRODUÇÃO

Grandes máquinas elétricas como motores de indução monofásicos, motores síncronos, motores assíncronos trifásicos e motores de corrente contínua são utilizados quando se necessita de uma conversão contínua de energia. Entretanto, existem algumas aplicações especiais nas quais não é necessário utilizar um processo de conversão contínua de energia. Por exemplo, a robótica requer sistemas que sejam capazes de realizar o posicionamento de um braço mecânico em uma determinada posição com uma determinada dinâmica. Outra aplicação, por exemplo, requer a utilização de um motor capaz de realizar uma operação específica. O princípio de funcionamento básico desses motores é igual ao princípio de funcionamento das máquinas elétricas girantes apresentadas nos capítulos anteriores. Entretanto, o servomotor difere no projeto, na construção e no modo de operação.

Servomotor, muitas vezes chamado motor para controle, é um motor elétrico especialmente projetado e construído para uso em sistemas de controle realimentados, exercendo o papel de elemento atuador. A potência nominal desses motores pode variar desde frações até centenas de watts. Esses motores possuem uma resposta dinâmica elevada, requerendo pequena inércia do rotor. Outra característica desses motores é que eles possuem menor diâmetro e maior comprimento. Os servomotores normalmente funcionam em baixa velocidade com conjugado elevado. Entretanto, podem funcionar com velocidade elevada, uma vez que a faixa de velocidade dos servomotores varia entre 2.000 e 6.000 rotações por minuto. Como exemplo de aplicações onde se utilizam servo motores é possível citar: empacotadeiras, esteiras com paradas programadas, máquinas de corte e solda, máquinas gráficas, computadores, controladores de processo, etc.

Quando comparadas às soluções com inversores de frequência e motores de indução, as principais vantagens são rápida aceleração, grande precisão de velocidade, maior controle de torque, aliado à possibilidade de controle de posição.

Conceitos básicos

O servomotor é projetado para funcionar aliado a um servoconversor, formando um conjunto conhecido por servoacionamento, capaz de seguir fielmente uma referência de torque, velocidade ou posição. A Figura 61 ilustra o conjunto servomotor e servoconversor.

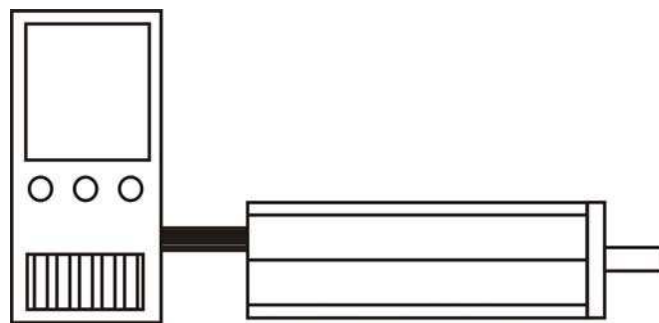


Figura 61– Conjunto servomotor e servoconversor.

As principais características que se deseja em qualquer servomotor são: rotação suave, elevada dinâmica, baixo nível de ruído e vibração, conjugado de saída do motor aproximadamente proporcional à tensão aplicada e sentido do conjugado determinado pela polaridade instantânea da tensão de controle.

O tipo de servomotor mais utilizado atualmente é o servomotor alimentado a partir de uma fonte de alimentação alternada. Nesta configuração, normalmente, o rotor utiliza ímãs permanentes, geralmente fabricados com terras raras. A carcaça é fabricada em alumínio, o estator é formado por um pacote de lâminas e um sensor (encoder ou resolver) é responsável por fornecer sinais de realimentação para o servoconversor. Através desses sinais o conversor é capaz de acionar de forma precisa o servomotor.

O sensor resolver é um tipo de transformador rotativo. Um sinal elétrico alternado é aplicado ao primário deste transformador rotativo e nos dois enrolamentos de saída, um sinal alternado induzido de acordo com a lei da indução de Faraday permite obter a velocidade e a posição do eixo do rotor. O sinal de saída do resolver é um sinal analógico. O sinal de saída de um encoder é um sinal digital.

Os servomotores podem ser classificados como servomotor de corrente contínua e servomotor de corrente alternada.

Servomotor de corrente contínua

O servomotor de corrente contínua possui excitação de campo independente ou magnetismo permanente como fonte primária de fluxo. O servomotor de corrente contínua normalmente possui controle na armadura. A armadura é projetada de modo a possuir um elevado valor de resistência de tal forma que a relação entre o conjugado e a velocidade é linear, e possui coeficiente angular negativo. O coeficiente angular positivo representa um amortecimento negativo no sistema de controle, o que pode levar à instabilidade do sistema. A Figura 62 ilustra o servomotor de corrente contínua com excitação independente e sua respectiva curva conjugado em função da rotação.

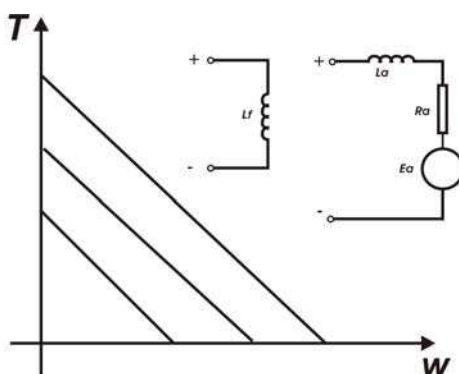


Figura 62– Servomotor com excitação independente e respectiva curva de conjugado versus velocidade.

Este servomotor possui alimentação de campo CC fornecida por uma fonte de tensão constante. Este método de controle possui certas vantagens dinâmicas. Uma variação súbita, grande ou pequena, da corrente de armadura, produzida por um sinal de erro, causará uma resposta quase imediata no conjugado. Se o sinal de erro e a polaridade da tensão da armadura se invertem, o motor gira no sentido oposto.

Servomotor de corrente alternada

O servomotor de corrente alternada é uma máquina síncrona projetada para realizar operações que uma máquina elétrica girante convencional não é capaz de realizar. O Servomotor de corrente alternada é robusto e possui menor inércia. Entretanto, é uma máquina não linear e sua característica conjugado versus velocidade não é tão ideal quanto a do servomotor de corrente contínua. Além disso, é uma máquina que possui menor conjugado que outra de corrente contínua, considerando que ambas possuem tamanhos equivalentes.

Referências Bibliográficas

Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. Fundamentos da Física 3: Eletromagnetismo. Livros Técnicos e Científicos, 1996.

Sadiku, M. N. O. Elementos do Eletromagnetismo. Bookman, 2004.

Bastos, J. P. A., Eletromagnetismo para engenharia. Editora da UFSC, 2004.

Carvalho, G. Máquinas Elétricas, teoria e ensaios. Editora Érica, 2006.

Oliveira, J. C.; Cogo, J. R.; Abreu J. P. G. Transformadores, teoria e ensaios. Editora Edagard Blucher, 2006.

Fitzgerald, A. E.; Kingsley C.; Umans, S. D. Electric Machinery. McGraw-Hill, 1990.

Kosow, I. I. Máquinas Elétricas e Transformadores. Editora Globo, 2000.

Sen, P. C. Principles of Electric Machines and Power Electronics. John Wiley, 1997.

Toro, V. D. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Livros Técnicos e Científicos, 1999.

Martignoni, A. Transformadores. Editora Globo, 1969.

Martignoni, A. Máquinas Elétricas de Corrente Contínua. Editora Globo, 1970.

Martignoni, A. Máquinas de Corrente Alternada. Editora Globo, 2005.

Guia Operacional de Motores Elétricos, Cepel-Eletróbrás.

Guia Operacional de Acionamentos Eletrônicos, Cepel-Eletróbrás.

Catálogo Geral de Motores Elétricos, WEG.

Módulo 1: Comando e Proteção. WEG.